



**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO  
PORTLAND POR ARGILAS CALCINADAS NA  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS**

**LUCAS DE PAULA VASQUES**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 EM ENGENHARIA  
CIVIL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**BRASÍLIA/DF, JULHO DE 2019**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO  
PORTLAND POR ARGILAS CALCINADAS NA  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS**

**LUCAS DE PAULA VASQUES**

**ORIENTADOR: JOÃO HENRIQUE DA SILVA RÊGO**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM SISTEMAS  
CONSTRUTIVOS E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL**

**BRASÍLIA / DF: JULHO / 2019**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO  
PORTLAND POR ARGILAS CALCINADAS NA  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS**

**LUCAS DE PAULA VASQUES**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**JOÃO HENRIQUE DA SILVA RÊGO, D. Sc. (ENC/UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO, D. Sc. (ENC/UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**DIVINO GABRIEL LIMA PINHEIRO, Msc. (IFG)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 12 de JULHO de 2019.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

VASQUES, LUCAS DE PAULA

Influência da Substituição do Cimento Portland por Argilas Calcinadas na Resistência à Compressão de Argamassas [Distrito Federal] 2019.

xiv, 82 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2019)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Fíler Silícico

2. Argamassa

3. Argila Calcinada

4. Resistência à compressão

I. UnB/FT/Engenharia Civil

II. Índice de desempenho

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VASQUES, L.P. (2019). Influência da substituição do cimento Portland por Argilas Calcinadas na resistência à compressão de argamassas. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 82 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lucas de Paula Vasques

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Influência da substituição do cimento Portland por argilas calcinadas na resistência à compressão de argamassas

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2019

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Lucas de Paula Vasques

Residencial Interlagos, conj. J casa 9 – Jardim Botânico

71680-375 – Brasília/DF - Brasil

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Walter e Paula, que sempre me apoiaram no sonho de ser um engenheiro. Também à minha irmã Letícia, a quem amo e sempre cuidarei.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pela sua misericórdia, graça e amor entregues a mim todos os dias.

A meus pais, que me educaram e me tornaram quem eu sou hoje. A meu pai, Walter, que me apoiou e sempre foi um exemplo de dedicação e sucesso. A minha mãe, Paula, com quem posso sempre contar e que sempre se faz presente. À minha irmã Letícia, que nunca deixou de me incentivar e me auxiliar sempre que necessário. A eles, que me apoiaram nos bons e nos maus momentos e que me ensinaram a persistir, meu eterno amor.

Ao meu orientador, professor João Henrique, por todo o conhecimento transmitido, pela compreensão, pela disposição e orientação durante minha caminhada acadêmica.

Aos professores membros da banca por se disporem a avaliar este trabalho, pelas sugestões a serem levantadas e pela colaboração no aperfeiçoamento desta pesquisa.

Ao professor Divino Gabriel, por disponibilizar o seu tempo e o laboratório no IFG para a realização desta pesquisa. Agradeço a disponibilidade, paciência e todo o auxílio prestado durante todos estes meses.

Ao Yuri Sotero, por há anos me auxiliar, aconselhar e motivar a trilhar o caminho acadêmico. Por todas as horas vividas em laboratórios juntos e pela sempre imediata disposição em ajudar.

Um agradecimento especial aos meus alegres amigos Cássio, May, Ana Paula, Cecília e Bárbara que estiveram ao meu lado durante o desenvolvimento deste trabalho e me acompanharam em ensaios, noites de estudos, momentos de aflições ou de celebrações, vocês foram essenciais.

Ao Rebelo, Clara, Vitor, Thabata, João, Mariana, André e tantos outros que fizeram parte da minha graduação do início ao fim, um enorme obrigado. Algumas batalhas só são vencidas com o auxílio dos mais confiáveis amigos.

A FAP/DF pelo apoio financeiro no desenvolvimento desta pesquisa por meio do processo 0193.001641/2017.

A UnB, pelas incríveis oportunidades oferecidas, pelos anos de amadurecimento e por todo o conhecimento adquirido. E a 100ª Turma de Engenharia Civil, pelos anos de companheirismo, de risadas, de alegrias e sofrimentos, sempre juntos.

A todos envolvidos, um grande obrigado.

*Uma mente necessita de livros da  
mesma forma que uma espada necessita de  
uma pedra de amolar, se quisermos que se  
mantenha afiada.*

*(George R. R. Martin)*



## RESUMO

Atualmente, o desenvolvimento e uso de cimentos sustentáveis tem ganhado cada vez mais destaque no meio acadêmico. Isso se deve ao fato de que a produção do cimento Portland comum é responsável por grande gasto energético e liberação de agentes poluentes na atmosfera. Diversas pesquisas relacionadas a materiais que tenham serventia como materiais cimentícios suplementares (MCS) do clínquer têm sido desenvolvidas no Brasil e o uso de argilas calcinadas tem se mostrado promissor. Esse trabalho pretende analisar a influência da substituição parcial de cimento Portland por argilas calcinadas, provenientes da região do Distrito Federal e Entorno, na resistência à compressão de argamassas. O programa experimental foi dividido em 3 etapas: Na etapa 1 foi produzido um fíler silícico a partir da moagem de areia normal, e foram produzidas duas argilas calcinadas por meio de queima em mufla a 750 °C seguida de moagem do material; Na etapa 2 foi feita a caracterização dos materiais, de forma a avaliar a similaridade dos MCS, afim de avaliar se estes apresentaram comportamento físico similar possibilitando a diferenciação dos efeitos físicos e pozolânicos em cada traço; Na etapa 3 foram moldados 9 traços e uma referência com os 3 MCS em diferentes teores de substituição e analisados o consumo de aditivo superplastificante, o índice de desempenho de argamassas nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias, além disso foi analisada a influência dos efeitos físicos e químicos de cada MCS na resistência à compressão das argamassas, e após isso efetuada análise estatística dos dados. O uso do fíler silícico viabilizou a identificação do efeito pozolânico das argilas calcinadas na resistência à compressão nas misturas. Foi possível averiguar que cerca de 50% do ganho de resistência da argila B aos 28 dias pode ser atribuído ao efeito pozolânico deste material, enquanto o mesmo pode ser dito para 43% do ganho de resistência quando se utiliza a argila A. Ao comparar os teores analisados, foi constatado que o teor com melhor desempenho para argila calcinada A foi de 15%, enquanto para a argila calcinada B foi de 25%. A argila calcinada B apresentou desempenho superior em termos de resistência à compressão e de efeitos pozolânicos, absolutos e relativos, quando comparada à argila calcinada A. O uso da primeira é recomendado para a produção de cimentos de alto desempenho, enquanto a argila calcinada A é recomendada para a correção de cimentos com resistências entre 30 e 40 MPa.

**Palavras-chave:** Argila calcinada, resistência à compressão, fíler silícico, argamassa, cimento Portland.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Importância do tema .....	1
1.2	Motivação da pesquisa.....	3
1.3	Objetivos .....	4
1.3.1	Objetivo Geral.....	4
1.3.2	Objetivos Específicos.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho.....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>6</b>
2.1	Efeitos da Argila Calcinada no Cimento Portland .....	6
2.2	Efeitos do Fíler silícico no Cimento Portland .....	16
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>23</b>
3.1	Materiais Utilizados .....	24
3.2	Etapa 01 - Produção do Fíler Silícico e das Argilas Calcinadas .....	25
3.2.1	Produção do Fíler Silícico (FS).....	25
3.2.2	Produção das Argilas Calcinadas (ACA e ACB) .....	26
3.3	Etapa 02 - Caracterização dos materiais .....	27
3.3.1	Massa específica .....	28
3.3.2	Resistência à compressão do cimento Portland .....	29
3.3.3	Granulometria à laser .....	29
3.3.4	Superfície específica BET.....	29
3.3.5	Espectroscopia de fluorescência de raios-X (FRX) .....	29
3.3.6	Difração de raios-X (DRX).....	29
3.3.7	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	30
3.4	Etapa 03 - Avaliação do Índice de Desempenho à Compressão .....	30
3.4.1	Preparo das Argamassas.....	30
3.4.2	Ensaio de Resistência à Compressão .....	33
3.4.3	Determinação do Índice de Desempenho.....	33
3.4.4	Proposta para Determinação dos Efeitos Pozolânico e Físico .....	34
3.4.5	Análise Estatística .....	36
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>37</b>
4.1	Resultados de Caracterização dos Materiais .....	37
4.1.1	Massa específica .....	37
4.1.2	Resistência à compressão do cimento Portland .....	37
4.1.3	Granulometria à laser .....	38
4.1.4	Superfície específica BET.....	39

4.1.5	Espectroscopia de fluorescência de raios-X (FRX) .....	40
4.1.6	Difração de raios-X (DRX).....	41
4.1.7	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	46
4.2	Teores de Aditivo SuperPlastificante (SP) Adotados .....	49
4.3	Resultados de Resistência À Compressão.....	50
4.4	Análise do Índice de Desempenho das Misturas por Tipo de MCS Utilizado.....	50
4.4.1	Misturas contendo Fíler Silícico .....	51
4.4.2	Misturas contendo Argila Calcinada A .....	52
4.4.3	Misturas contendo Argila Calcinada B .....	54
4.5	Análise do Índice de Desempenho das Misturas por Teor de Substituição .....	56
4.5.1	Misturas contendo Teor de 15% .....	57
4.5.2	Misturas contendo Teor de 25% .....	58
4.5.3	Misturas contendo Teor de 35% .....	59
4.6	Proposta de Avaliação dos Efeitos Pozolânico e Físico.....	60
4.6.1	Teor de 15% .....	60
4.6.2	Teor de 25% .....	62
4.6.3	Teor de 35% .....	63
4.7	Análise estatística dos dados.....	64
4.7.1	Análise de Variância – ANOVA.....	64
4.7.2	Teste de Duncan.....	65
4.8	Considerações Gerais.....	67
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>71</b>
5.1	Recomendações para Futuras Pesquisas .....	72
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>73</b>
	<b>APÊNDICE A – Curvas Granulométricas Individuais dos Aglomerantes Utilizados.....</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE B - Resultados de Resistência à Compressão Detalhados por Corpo de Prova .....</b>	<b>81</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Características físico-químicas da argila calcinada a 650 °C (Adaptado de CORDEIRO et al., 2010) .....	12
Tabela 3.1 - Resumo da caracterização dos materiais.....	27
Tabela 3.2– Nomenclatura e composição dos traços analisados.....	31
Tabela 3.3 – Quantitativo de materiais para moldagem de 6 corpos de prova .....	31
Tabela 3.4 – Limites de tolerância de tempo de ruptura dos corpos de prova (ABNT NBR 7215, 1997) .....	33
Tabela 4.1 - Massa Específica dos Materiais Utilizados.....	37
Tabela 4.2 -Resultados de Resistência à Compressão do CP I 40 utilizado na pesquisa e limites mínimos segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018).....	38
Tabela 4.3 - Resultados Obtidos nos ensaios de Granulometria à Laser (unidades: $\mu$ ) .....	38
Tabela 4.4 - Resultados de BET dos Materiais .....	39
Tabela 4.5 - Resultados de FRX .....	40
Tabela 4.6 - Demanda de Aditivo Superplastificante das misturas estudadas .....	49
Tabela 4.7 - Resultados de Resistência à Compressão .....	50
Tabela 4.8 - Índices de Desempenho à Compressão das Misturas .....	51
Tabela 4.9 - Influência dos Efeitos Físico e Pozolânico nos teores de 15% de FS, ACA e ACB .....	60
Tabela 4.10 - Influência dos Efeitos Físico e Pozolânico nos teores de 25% de FS, ACA e ACB .....	62
Tabela 4.11 - Influência dos Efeitos Físico e Pozolânico nos teores de 35% de FS, ACA e ACB .....	63
Tabela 4.12 - Resultado da Análise de Variância .....	65
Tabela 4.13 - Resultados do Teste de Duncan .....	65
Tabela 4.14 -Resultados da Influência dos efeitos de ACA e ACB na Resistência À Compressão das Misturas .....	68
Tabela 4.15 - Resistência À Compressão relativa ao Efeito Pozolânico (28 dias) .....	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -Estrutura da calculinita (a), ilita (b) e montmorilonita (c) (ANTONI, 2013).....	7
Figura 2.2 - Desidroxilação da Caulinita (SAN NICOLAS, 2011) .....	8
Figura 2.3 - Efeito de Diluição - (a): sistema referência com relação a/c = 0,3; (b): “sistema (a)” com 60% de substituição de fíler inerte; (c): “sistema (b)” com a remoção do fíler, resultando em a/c de 0,67. (DE LA VARGA et al., 2018) .....	9
Figura 2.4 - Resistência à compressão aos 2, 7 e 28 dias (TIRONI et al., 2014a) .....	11
Figura 2.5 - Perda de massa obtida pelo TG durante: (a) desidratação das fases de CSH, CAH e CASH e (b) desidratação do CH (TIRONI et al., 2014a) .....	11
Figura 2.6- Resistência à compressão dos concretos com argila calcinada a 650 °C. (CORDEIRO et al.,2010) .....	13
Figura 2.7 - Evolução da resistência à compressão das argamassas A15, A30, A45 e A60 (LINS, 2017) .....	14
Figura 2.8- Índice de desempenho na resistência à compressão, em relação ao traço OPC (100% de cimento Portland) (ANTONI et al., 2012) .....	16
Figura 2.9 - Calor adicional (com relação a M1) liberado devido ao efeito de espaçamento, de nucleação e pozolânico (DE LA VARGA et al., 2018) - ADAPTADO .....	19
Figura 2.10 - Resistência à Compressão de Argamassas GDS10, GDS20, GDS30 e GDS40, com 10, 20 30 e 40% de fíler silícico, respectivamente (ALHOZAIMY et al., 2012) - ADAPTADO .....	21
Figura 2.11- Índice de desempenho na resistência à compressão, em relação à substituições equivalentes de fíler silícico (ANTONI et al., 2012) .....	22
Figura 3.1 -Fluxograma geral da metodologia de pesquisa. ....	23
Figura 3.2 - Fluxograma de caracterização dos materiais .....	28
Figura 3.3 - Misturador planetário utilizado no IFG/Formosa.....	32
Figura 3.4 - Prensa EMIC GR048 do IFG/Formosa .....	33
Figura 4.1 - Curvas Granulométricas do CPI, FS, ACA e ACB .....	39
Figura 4.2 - Resultado de DRX do Cimento Portland I .....	42
Figura 4.3 - Resultado de DRX do Fíler Silícico.....	43
Figura 4.4 - Resultado de DRX da Argila Calcinada A.....	44
Figura 4.5 - Difrátograma de Metacaulim com identificação de Halo amorfo relativo à metacaulinita(HOPPE FILHO et al., 2017) .....	44
Figura 4.6 - Resultado de DRX da Argila Calcinada B .....	45
Figura 4.7 – Resultado de MEV do cimento Portland I (a) com ampliação de 100 vezes e (b) com ampliação de 409 vezes. ....	46
Figura 4.8 - Resultado de MEV do Fíler Silícico (a) com ampliação de 100 vezes e (b) com ampliação de 371 vezes.....	47
Figura 4.9 - Resultado de MEV da Argila Calcinada A (a) com ampliação de 102 vezes e (b) com ampliação de 177 vezes .....	47
Figura 4.10 - Resultado de MEV da Argila Calcinada B com ampliação de (a) 100 vezes, (b) 175 vezes, (c) 500 vezes e (d) 379 vezes .....	48
Figura 4.11- Índices de Desempenho dos traços contendo Fíler Silícico .....	52
Figura 4.12 - Índices de Desempenho dos traços contendo Argila Calcinada A .....	53
Figura 4.13 - Índices de Desempenho dos traços contendo Argila Calcinada B .....	55
Figura 4.14 - Índice de Desempenho das misturas contendo 15% de substituição.....	57
Figura 4.15 - Índice de Desempenho das misturas contendo 25% de substituição.....	58
Figura 4.16 - Índice de Desempenho de ACA e ACB segundo a NBR 5752 (ABNT, 2014) .....	59

Figura 4.17 - Índice de Desempenho das misturas contendo 35% de substituição.....	59
---	----

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

O concreto é o material mais utilizado na indústria da construção civil na atualidade. Em 2010 a produção mundial de concreto no mundo foi de 33 bilhões de toneladas, consumindo 3,7 bilhões de toneladas de clínquer (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Já em 2015 foi estimada uma produção de 4,6 bilhões de toneladas de cimento no mundo (CEMBUREAU, 2015). Isso devido a seu baixo custo, alta resistência à compressão, durabilidade e facilidade de ser executado em diversos elementos estruturais. Entretanto o principal componente do concreto é o cimento Portland e a produção desse material é responsável por grandes gastos de energia e altas taxas de liberação de poluentes.

A produção do cimento Portland é responsável por grande parcela da emissão de carbono no mundo, cerca de 8% da emissão global de CO<sub>2</sub> na atmosfera, segundo Lhene e Preston (2018). Devido a isso pesquisadores estão procurando opções para substituí-lo parcialmente por novos tipos de materiais. Entretanto questões sobre a segurança e a durabilidade têm sido levantadas em relação a esses materiais (LI et al., 2017).

Segundo Scrivener (2014), a opção mais viável para obtenção de cimentos mais sustentáveis, envolve a mistura do clínquer do cimento Portland com níveis crescentes de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS). De acordo com Pinheiro (2018), com o crescimento do uso e a evolução das MCS minerais é possível reduzir a quantidade de clínquer que compõe o produto final. No Brasil, o fator clínquer/cimento passou de 80% em 1990 para 68% em 2010, sendo um dos menores na escala global. A utilização das MCS é diretamente responsável por essa diminuição, quer sejam pozolanas naturais como as argilas calcinadas ou resíduos provenientes de siderúrgicas e usinas termoeletricas, como as escórias e cinzas volantes.

Além disso, a incorporação de MCS diminui o risco de fissuração de origem térmica, devido ao seu baixo calor de hidratação, aumenta a resistência final e a impermeabilidade devido ao refinamento dos poros, fortalece a zona de transição na interface, aumenta a durabilidade em relação ao ataque por sulfato e à expansão álcali-agregado (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Os materiais cimentícios suplementares pozolânicos consomem o hidróxido de cálcio (portlandita) produzido na hidratação do cimento. Esta molécula, ao contrário dos silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, contribui muito pouco para a resistência da pasta de cimento hidratada e é, dentre os produtos da hidratação, o primeiro a ser solubilizado e lixiviado pela água. Assim, o consumo da portlandita pela pozolana produz benefícios para a resistência mecânica de concretos e argamassas. Os efeitos benéficos da utilização de pozolanas em concretos não se limitam à reação pozolânica. Há também o efeito físico proveniente da capacidade das partículas destes materiais, que em geral apresentam tamanho micrométrico, posicionarem-se nos interstícios entre partículas de cimentos e na interface agregado-pasta (CORDEIRO et al., 2010).

Segundo Jalal et al. (2015), a utilização de MCS pode trazer melhorias para as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. Os autores comentam que é possível se projetar concretos com altos volumes de MCS que podem trazer benefícios ambientais e técnicos quando bem proporcionadas.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), pode-se classificar MCS em *materiais naturais* e *subprodutos*. Os subprodutos são os materiais que não se caracterizam como produtos primários nas indústrias que os produzem, geralmente exigem algum tipo de processamento (como secagem ou pulverização). Nessa categoria incluem-se a escória de alto forno, cinzas volantes e cinza da casca de arroz. Já os materiais naturais se caracterizam por serem aqueles processados unicamente para se produzir um material pozolânico. O seu processamento pode incluir britagem, moagem e ativação térmica. Na categoria de materiais naturais se incluem diversos derivados de rochas vulcânicas, como os vidros e os tufos vulcânicos, além de argilas calcinadas, que exigem um tratamento térmico para aumentar sua reatividade.

Ao se analisar a literatura em relação ao uso de MCS, conclui-se que é consenso que o uso destas, caso dosado de maneira correta, resulta em diminuição da emissão de poluentes, redução do gasto energético na produção do cimento além da possibilidade de melhoria das propriedades mecânicas tanto de argamassas quanto de concretos.

Devido a este fato, é de grande relevância o estudo dos diversos tipos de MCS existentes, e principalmente das disponíveis na região do Distrito Federal, de forma a se aperfeiçoar o seu uso na indústria cimenteira local, valorizando o material da região e contribuindo para a diminuição das emissões de poluentes.



## **1.2 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA**

As argilas naturais são amplamente utilizadas como MCS no Brasil. Este material necessita de extração, calcinação e moagem (para se tornar uma argila calcinada), mas é amplamente disponível no mundo. Por certo, no Distrito Federal, onde existem jazidas de argila de natureza caulinítica, é a principal pozolana utilizada como matéria-prima na fabricação de cimento Portland (LACERDA, 2005 apud PINHEIRO, 2018).

A reatividade das argilas calcinadas depende principalmente da estrutura da caulinita da argila natural: quando a caulinita da argila natural possui uma estrutura desordenada, após um processo adequado de calcinação e moagem, esta possuirá elevado potencial pozolânico e permitirá o uso de teores de substituição mais elevados mantendo o mesmo desempenho de um traço sem o uso da adição (TIRONI et al., 2014a).

A necessidade de redução da produção de clínquer e a disponibilidade de jazidas de argilas de natureza caulinítica no DF colabora para o interesse, tanto da comunidade acadêmica quanto da indústria cimenteira local, em um MCS que seja eficiente na substituição do cimento Portland e economicamente viável. A produção eficiente de argilas calcinadas a partir das argilas cauliníticas encontradas no solo da região do Distrito Federal e Entorno, por meio de processos de calcinação e moagem, pode ser uma possível solução para a situação atual.

Além disso, há poucos trabalhos que avaliam efetivamente o efeito físico e pozolânico de argilas calcinadas nas propriedades mecânicas de argamassas. Essa pesquisa utilizará um filer silícico visando analisar o efeito físico e pozolânico das argilas calcinadas analisadas na resistência à compressão das argamassas.

Este trabalho está inserido na linha de pesquisa do grupo de Pesquisa e Inovação em Materiais Cimentícios do PECC (Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil) da Universidade de Brasília, e visa complementar os resultados dos trabalhos já realizados. Os estudos de Pinheiro (2018), Martins (2018), Andrade (2017), Lins (2017) e Rocchi e Oliveira (2017) são exemplos de outros trabalhos produzidos nesta mesma linha de pesquisa.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GERAL**

Este trabalho tem como objetivo geral a avaliação do efeito da substituição parcial do cimento Portland por argilas calcinadas na evolução da resistência à compressão de argamassas.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Produzir duas argilas calcinadas com reatividade pozolânica a partir de argilas naturais disponíveis na região do DF e Entorno, e comparar suas propriedades;
- Produzir um fíler silícico inerte com granulometria que torne possível avaliar os efeitos físicos e pozolânicos das argilas calcinadas nas misturas cimentícias;
- Comparar os efeitos da substituição das argilas calcinadas no cimento Portland, na resistência à compressão de argamassas;
- Avaliar o efeito físico e pozolânico de cada um dos dois tipos de argilas calcinadas utilizados (ACA e ACB);

## **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho tem sua estrutura dividida em cinco capítulos, além das referências bibliográficas e apêndices.

O primeiro capítulo consiste na introdução do tema, a motivação e a importância da pesquisa. Também estão inclusos neste capítulo os objetivos gerais e específicos da pesquisa, assim como a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo aborda a revisão da literatura relativa ao tema. São apresentados estudos sobre os efeitos físicos e químicos da incorporação de argilas calcinadas e fíler silícico em materiais cimentícios.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia do trabalho, detalhando os materiais utilizados, o programa experimental e o cronograma da pesquisa. São expostos os ensaios de caracterização dos materiais, a metodologia adotada no preparo das argamassas, além do detalhamento dos traços analisados no trabalho. Ainda é apresentada a metodologia para o

ensaio de resistência à compressão, desacoplamento dos efeitos físicos e químicos dos MCS analisados e análise estatística dos resultados.

O quarto capítulo trata dos resultados obtidos na caracterização dos materiais e por meio dos ensaios de resistência à compressão, ou seja, análise do índice de desempenho das argamassas e análise estatística dos dados obtidos. São discutidos os efeitos físicos e pozolânicos dos diferentes tipos de materiais e teores de substituição adotados, além de analisar também a relevância estatística da diferença entre os resultados obtidos.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões obtidas a partir dos resultados percorridos no capítulo 4 e expostas as considerações finais do projeto.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho, seguidas dos Apêndices A e B.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

Neste capítulo será tratado inicialmente sobre os diversos efeitos da incorporação de argilas calcinadas em sistemas cimentícios. Dessa forma, será possível compreender a influência deste MCS no comportamento mecânico, mais precisamente na resistência à compressão, em misturas cimentícias.

Além disso, será abordado também o efeito do uso de fíler silícico em sistemas cimentícios. O estudo deste material se deve ao fato de que a compreensão do comportamento deste MCS é fator determinante para a avaliação do comportamento de materiais pozolânicos, como argilas calcinadas, o que será evidenciado ao longo deste capítulo.

### **2.1 EFEITOS DA ARGILA CALCINADA NO CIMENTO PORTLAND**

As argilas calcinadas são o resultado da calcinação de tipos específicos de argilas naturais presentes na crosta terrestre. Segundo Mehta e Monteiro (2014), essas argilas naturais não apresentam reatividade considerável com cal a menos que as estruturas cristalinas de seus minerais argilosos sejam modificadas por um tratamento térmico em temperaturas da ordem de 600 a 900 °C, a calcinação. Apenas após este tratamento (e de um processo de moagem, a depender do material) o material pode ser considerado uma pozolana, e dessa forma ser utilizado como adição ou substituição parcial em materiais cimentícios.

Já segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), as argilas calcinadas são materiais advindos da calcinação de argilas submetidas a temperaturas entre 500 e 900 °C, de modo a garantir a sua reatividade com o hidróxido de cálcio.

As argilas calcinadas apresentam reatividade pozolânica distinta em função das propriedades físico-químicas de suas partículas (composição e morfologia das partículas) e das condições de queima adotadas, de acordo com Sabir et al. (2001), Mitrović e Zdujčić (2014) e Yanguatin et al. (2017). As argilas mais utilizadas para a produção de pozolana são as caulinitas, montmorilonitas e as ilitas (SOUZA SANTOS, 1966). Estas exigirão processos de calcinação diferentes entre si e resultando em materiais pozolânicos com reatividades distintas. A estrutura molecular é um dos fatores determinantes para definição dos parâmetros do processo de calcinação (GARCIA et al., 2015). Entre os tipos de argilas mencionados, a caulinita tem o maior potencial para atividade pozolânica, segundo estudos realizados por Sabir et al. (2001), entretanto a maioria dos depósitos de argila natural existentes conta com

argilas que não possuem material totalmente caulinítico. Na Figura 2.1 são apresentadas as estruturas para cada um dos três tipos de argila mencionados.

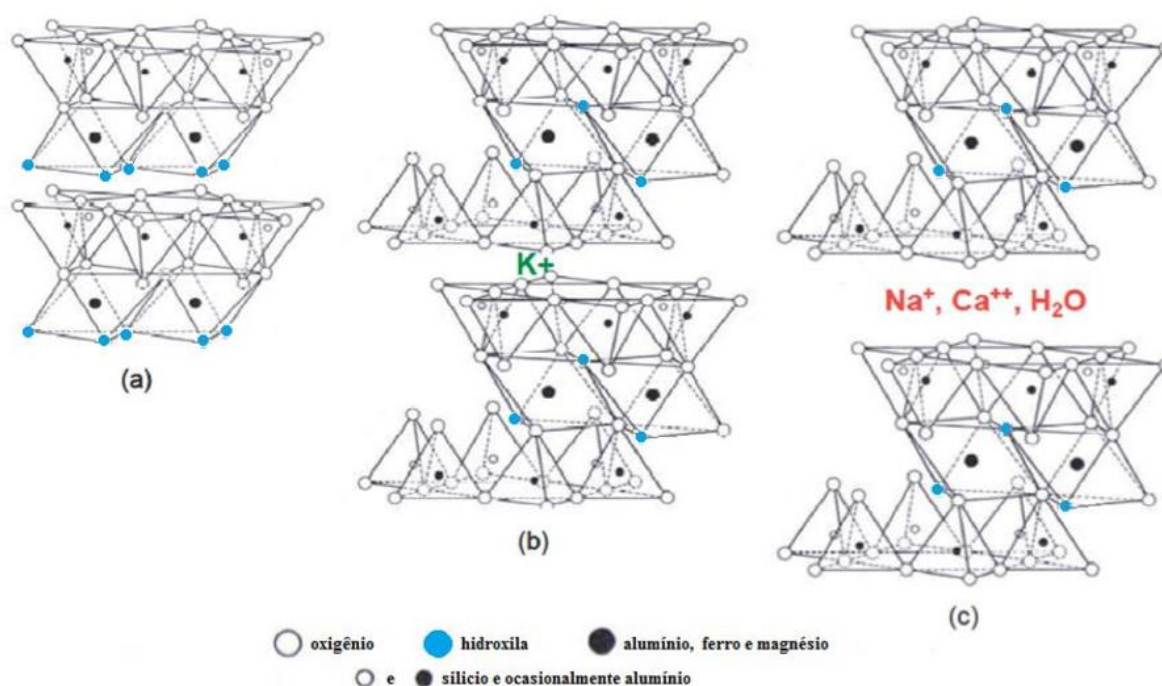


Figura 2.1 -Estrutura da calcinita (a), illita (b) e montmorilonita (c) (ANTONI, 2013)

O uso de argilas calcinadas como substituição parcial do cimento é recomendado por Tironi et al. (2014b) e Amin (2012). Segundo os autores, as argilas calcinadas promovem a redução da emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa e da energia gasta na produção dos materiais cimentícios, além de manter (ou até aprimorar) as propriedades mecânicas e a durabilidade desses materiais. Os autores ainda afirmam que entre as categorias de argilas calcinadas, as cauliníticas são as que apresentam maior reatividade pozolânica após o tratamento de calcinação e moagem. Dessa forma é necessário que se entenda como se dá o processo químico da calcinação das argilas, para que se possa compreender o comportamento desse material.

A temperatura a ser utilizada na calcinação é um dos principais fatores que influenciam na reatividade do material produzido. Caso o processo se dê abaixo de certa temperatura, a argila natural passará por um processo de desidratação, sem perder água de sua estrutura molecular, o que não resultará em um material reativo.

Tironi et al.(2014b) aponta que o processo de calcinação de argilas cauliníticas, em temperaturas entre 550 e 900°C, acarreta na desidroxilação da caulinita presente no material.

Neste processo de desidroxilação serão removidas as hidroxilas da estrutura molecular da argila, causando um desarranjo estrutural, gerando aluminossilicato amorfo ( $AS_2$ ), ou metacaulinita, composto que é responsável pela reatividade pozolânica da argila calcinada, conforme apresenta a Figura 2.2.

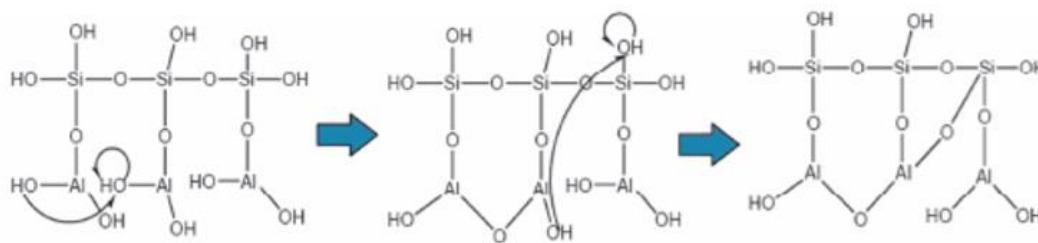
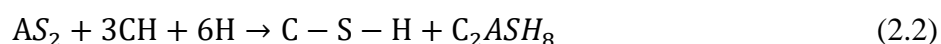
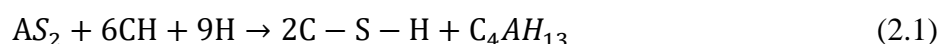


Figura 2.2 - Desidroxilação da Caulinita (SAN NICOLAS, 2011)

Caso a temperatura utilizada na calcinação seja muito elevada, o material passará por um processo de recristalização. Esse processo resulta em perda da reatividade do material, diminuindo sua eficiência como MCS.

As reações pozolânicas entre a metacaulinita ( $AS_2$ ) e a portlandita (CH) geram compostos de C-S-H e silicatos de alumínio hidratados em quantidades que dependem do CH disponível. De acordo com Murat (1983), caso exista maior disponibilidade de CH serão formados aluminatos de cálcio hidratados (Equação 2.1) e caso a quantidade de CH disponível seja baixa será formado o composto  $C_2ASH_8$ , ou C-A-S-H (Equação 2.2).



Sabe-se que o CH contribui muito pouco para a resistência à compressão dos materiais cimentícios, enquanto o composto C-S-H (assim como o C-A-S-H) é responsável pelo bom desempenho destes materiais quando submetidos à compressão. Dessa forma, fica claro que a conversão do hidróxido de cálcio em silicato de cálcio hidratado pela ação pozolânica é altamente benéfica para o desempenho mecânico de concretos e argamassas.

Segundo Tironi et al. (2014b), a incorporação de argilas calcinadas em materiais cimentícios resulta em efeitos físicos e químicos. Entre os efeitos físicos podem ser citados três os seguintes efeitos:

- Efeito fíler: As partículas do MCS, que possuem granulometria inferior à do clínquer, preenchem os espaços entre os grãos de cimento, gerando refinamento dos poros da mistura, resultando em uma microestrutura mais compacta;
- Efeito de nucleação: A superfície das partículas do MCS age como um ponto de nucleação para a hidratação do cimento. Esse processo resulta em aceleração da hidratação do cimento, em comparação a um traço sem MCS, devido aos diversos novos pontos de nucleação advindos do uso da argila calcinada.
- Efeito de espaçamento (ou diluição): este efeito consiste em um aumento da relação água/cimento ( $a/c$ ) devido à diminuição da concentração de cimento Portland na mistura. Entretanto, é importante ressaltar que a relação água/aglomerante ( $a/agl$ ) permanece constante. Este efeito resulta no aumento do espaçamento entre os grãos de cimento em relação a um traço sem qualquer tipo de MCS, o que simula uma relação  $a/c$  superior à relação  $a/agl$  real. É válido ressaltar que este fenômeno ocorrerá apenas com substituições de mesmo volume e dimensão em relação ao cimento Portland. A Figura 2.3 ilustra esse fenômeno.

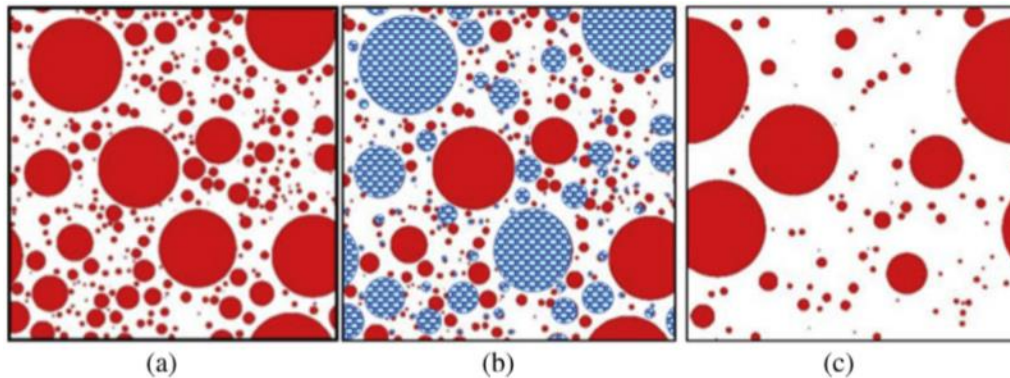


Figura 2.3 - Efeito de Diluição - (a): sistema referência com relação  $a/c = 0,3$ ; (b): “sistema (a)” com 60% de substituição de filer inerte; (c): “sistema (b)” com a remoção do filer, resultando em  $a/c$  de 0,67. (DE LA VARGA et al., 2018)

Já o principal efeito químico a ser mencionado é o efeito pozolânico das argilas. Este ocorre quando as partículas do material reagem com a portlandita presente na mistura, produzindo o C-S-H e outros compostos aluminosos a depender da concentração de portlandita disponível.

Contudo, apesar de todos os benefícios apresentados, a substituição de parte do cimento Portland por argilas calcinadas resulta em uma diminuição da quantidade de C-S-H

advindo da hidratação do cimento. Devido a isso é necessário dosar corretamente o teor de substituição adotado, de forma a garantir que se tenha um balanço entre os efeitos positivos para a resistência fornecidos pelos MCS e a perda de desempenho devida à diminuição do cimento Portland no material cimentício.

Os estudos de Cordeiro et al. (2010) e Antoni et al. (2012) reforçam a ideia da correta dosagem dos MCS. Nestes trabalhos foi concluído que as argilas calcinadas em geral surtem efeito de aumento da resistência à compressão mais pronunciado após os 7 dias de cura do material. Tal afirmação pode ser justificada pelo fato de que as reações pozolânicas ocorrem de forma lenta, e nas primeiras idades estes materiais atuam preponderantemente apenas por meio do efeito de preenchimento, o efeito fíler.

Como já foi mencionado anteriormente, sabe-se que o efeito da argila calcinada na mistura cimentícia é afetado severamente pelos fatores já mencionados, sendo estes: o tipo de argila natural utilizado; o processo de calcinação adotado; a granulometria do material; o balanço entre efeitos positivos e negativos na resistência à compressão; as diferentes taxas de atuação dos efeitos físicos e químicos; e o teor de substituição adotado. Logo é essencial que se conheçam todas estas características (químicas e físicas) das argilas calcinadas utilizadas, para que se entenda o tipo de efeito que estas terão no concreto ou argamassa estudados.

Tironi et al. (2014a) examinou a influência de dois tipos de argilas cauliníticas, advindas de solos argentinos, como MCS pozolânicos. Os autores compararam os efeitos, em argamassas, de substituições de 15 e 30% dos dois tipos de argilas calcinadas, sendo a argila A1 caracterizada como caulinítica com estrutura organizada, possuindo alta concentração de metacaulinita e baixa superfície específica, enquanto a argila A2 foi classificada como caulinítica com estrutura desordenada, possuindo menor quantidade de caulinita desordenada e maior superfície específica que A1. No estudo foram avaliados os traços 15A1 e 30A1, respectivamente substituições de 15 e 30% da argila calcinada A1, e 15A2 e 30A2, nomeados analogamente aos traços A1.

Foi constatado por Tironi et al. (2014a) que os traços com a adição A2 apresentaram efeitos pozolânicos já aos 2 dias de idade, enquanto as argilas A1 só surtiram efeito pozolânico aos 7 dias, além disso notou-se que a adição com maior efeito pozolânico aos 28 dias foi a de 30% da argila A2. Os autores afirmam que ambas as argilas tem boa reatividade pozolânica e A2 é mais reativa. Isso pode ser atribuído a maior superfície específica desse



material. Foi avaliado também o efeito desses materiais na resistência à compressão das argamassas, conforme explicitado na Figura 2.4.

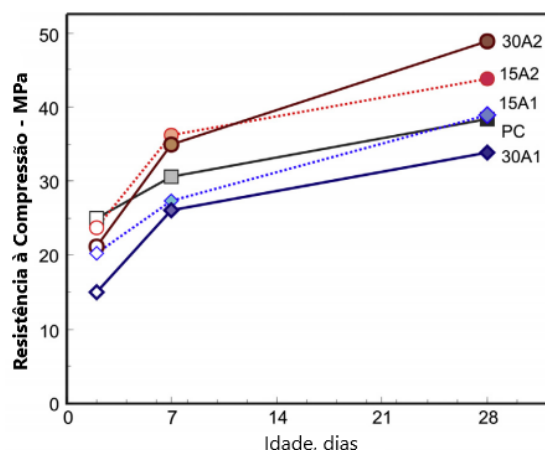


Figura 2.4 - Resistência à compressão aos 2, 7 e 28 dias (TIRONI et al., 2014a)

Nota-se que maior atividade pozolânica (resultado da maior superfície específica do material) de A2 resulta em maiores valores de resistência para os traços contendo esse MCS. O maior teor de substituição (30%) acarretou em maior conversão de CH em C-S-H pelas reações pozolânicas, confirmando os resultados de compressão, tal fato pode ser comprovado pelas análises termogravimétricas realizadas por Tironi et al. (2014a) apresentadas na Figura 2.5.

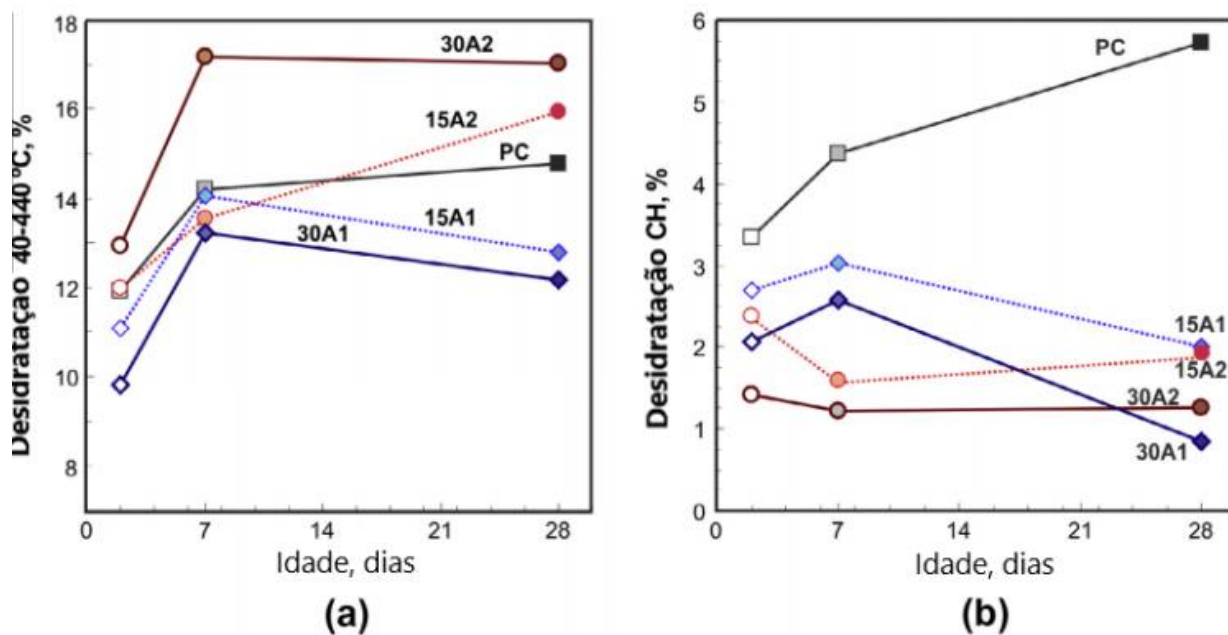


Figura 2.5 - Perda de massa obtida pelo TG durante: (a) desidratação das fases de CSH, CAH e CASH e (b) desidratação do CH (TIRONI et al., 2014a)

Os resultados apresentados por Tironi et al. (2014a) na Figura 2.5 demonstram que as argilas caulínicas calcinadas são MCS pozolânicos eficientes. É interessante notar que este estudo demonstra como o grau de amorfismo (desorganização da microestrutura) das argilas influencia diretamente no efeito desses materiais na mistura, podendo gerar mudanças consideráveis nas propriedades mecânicas dos materiais cimentícios. De acordo com o autor, o uso de uma dosagem apropriada de adição de argila calcinada ao cimento torna possível a obtenção de comportamento mecânico eficiente e aumento da durabilidade, além de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>.

Já em estudos com argilas calcinadas advindas de solos brasileiros, pode-se citar os estudos que Cordeiro et al. (2010) realizou, onde se desenvolveu uma argila calcinada advinda de argila natural encontrada em Campo dos Goyatacazes (RJ). Amostras da argila natural passaram por tratamentos térmicos a diferentes temperaturas, de forma que a temperatura de 650°C foi a que resultou em um produto com maior reatividade, e, portanto foi a adotada para o estudo. A Tabela 2.1 apresenta os teores dos compostos da argila calcinada resultante, onde nota-se que os compostos principais, SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, correspondem a 88,3% da composição em massa da argila.

Tabela 2.1- Características físico-químicas da argila calcinada a 650 °C (Adaptado de CORDEIRO et al., 2010)

Composto	Teor (% em massa)
SiO <sub>2</sub>	50,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,7
CaO	0,1
K <sub>2</sub> O	0,7
MgO	0,6
SO <sub>3</sub>	0,1
Perda ao fogo	5,1

No ensaio de Chapelle modificado, a argila calcinada apresentou valor de fixação igual a 535 mg/g (mg de CaO por g de pozolana), que pode ser considerado significativamente elevado. A superfície específica apresentada pela argila calcinada no estudo de Cordeiro et al. (2010) foi de 19630 m<sup>2</sup>/kg. Essa característica contribui para o valor de atividade pozolânica, avaliada pelo método de Chapelle modificado.

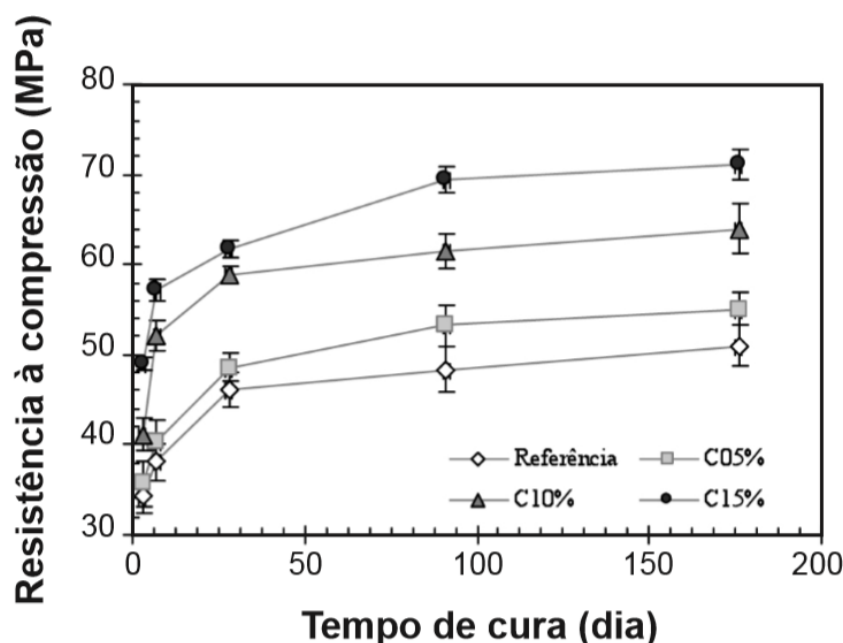


Figura 2.6- Resistência à compressão dos concretos com argila calcinada a 650 °C. (CORDEIRO et al.,2010)

A Figura 2.6 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão em concretos com teores de substituição de cimento por argila calcinada a 650°C de 5, 10 e 15% (nomeados respectivamente como C05%, C10% e C15%) realizados por Cordeiro et. al (2010). Os resultados encontrados pelos autores são apresentados. Foi observado pelos autores que os todos os teores de substituição apresentaram valores de resistência superiores à referência sem argila calcinada a partir dos 7 dias de idade. Além disso, foi constatado que o teor de 15% de substituição apresentou os maiores incrementos na resistência do concreto (cerca de 40% de aumento).

Já em um âmbito mais local, foram realizados trabalhos abordando o uso de argilas no DF como MCS em concretos e argamassas. Os estudos de Lins (2017), realizados na Universidade de Brasília, em argamassas contendo MCS comprovam a viabilidade do uso de argila calcinada como MCS e a seus efeitos na resistência à compressão de argamassas. Foi utilizada uma adição de argila calcinada, fornecida por uma cimenteira do Distrito Federal. Esta argila passou por ensaio de difratometria de raios-X (DRX), onde apresentou quantidades consideráveis de quartzo, caulinita e ilita. Foi realizado também ensaio de área superficial específica (BET) onde foi constatada uma superfície específica de 20,872 m<sup>2</sup>/g. Foram realizados ensaios de resistência à compressão em 4 traços contendo apenas adições de argilas calcinadas: A15, A30, A45 e A60 com substituições de 15, 30, 45 e 60% de

cimento Portland pela argila calcinada, respectivamente. A Figura 2.7 apresenta os resultados encontrados pela autora do estudo.

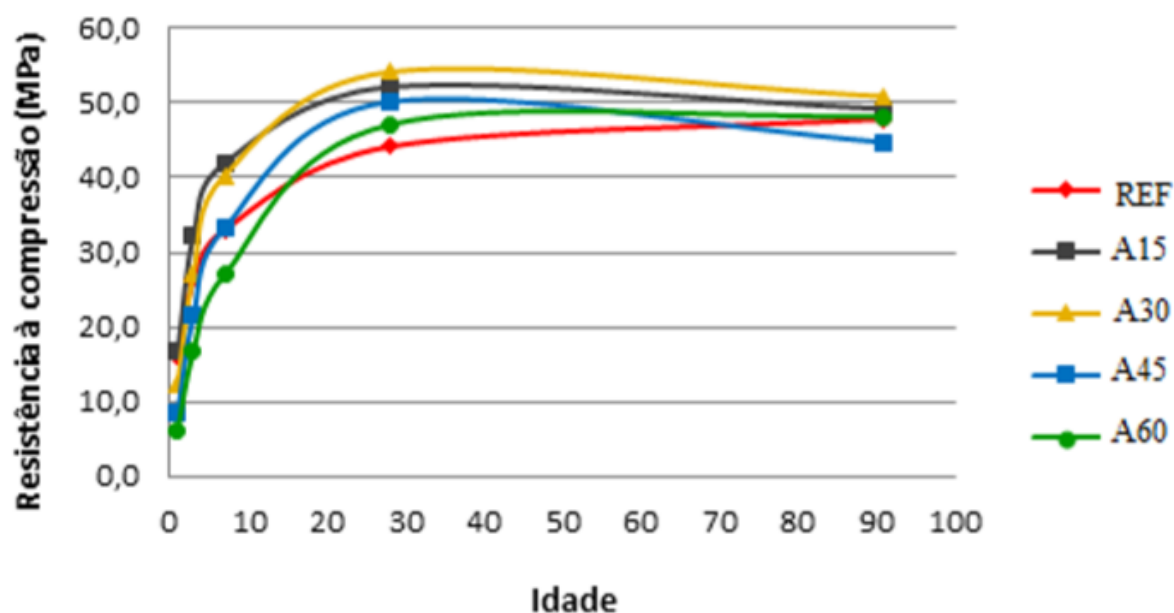


Figura 2.7 - Evolução da resistência à compressão das argamassas A15, A30, A45 e A60 (LINS, 2017)

Nas idades de 1, 3 e 7 dias, é possível verificar uma diferença expressiva entre os resultados obtidos por cada tipo de argamassa. De acordo com Lins (2017), esta foi ocasionada por uma redução da resistência em função do aumento do teor de argila calcinada. Porém, aos 28 e 91 dias, todos os traços passam a apresentar valores muito mais próximos. Ressalta-se que a autora atribui a queda dos resultados contendo argilas calcinadas aos 91 dias à variabilidade dos ensaios, resultando em inconsistência apresentada nesta idade.

Considerando os resultados de 28 dias, idade na qual avalia-se o desempenho mecânico dos cimentos, verifica-se que todas as misturas com adição de argila calcinada obtiveram resultados de resistência à compressão superiores, quando comparados ao resultado do cimento Portland comum. Esta melhora da resistência mecânica observada ratifica os benefícios provenientes das reações pozolânicas apontados por pesquisadores como Mehta e Monteiro (2014), que associam este bom desempenho à redução do hidróxido de cálcio, formação de C-S-H secundário, e refinamento dos poros no sistema cimentício (LINS, 2017).

Oliveira e Barborsa (2006), Amin et al. (2015), Bediako et al. (2017) e Taylor-Lange et al. (2015) realizaram estudos com adições de argilas cauliníticas calcinadas, e seus resultados comprovaram que a substituição de parte do cimento Portland por esse material é capaz de elevar a resistência à compressão das misturas em relação às misturas sem a adição de argilas calcinadas.

Bediako et al. (2017) utilizou substituições de argila calcinada de 20% em argamassas, alcançando um aumento da resistência à compressão da ordem de 10% aos 28 dias. Segundo o autor, as argilas calcinadas atuam acelerando o ganho de resistência como filler, principalmente nas primeiras idades, e por meio das reações pozolânicas nas idades mais tardias.

Há também diversos estudos que discorrem sobre a capacidade que MCS como argilas calcinadas, possuem de melhorar a durabilidade de misturas cimentícias. Segundo Mwititi et al. (2018), além dos efeitos na resistência à compressão, o uso de argilas calcinadas como MCS também contribui para o aumento da durabilidade, diminuição da porosidade e aumento da resistência à sulfatos de materiais cimentícios, além da redução da emissão de gases poluentes.

Outro autor a falar sobre o efeito das argilas calcinadas na durabilidade é Maraghechi et al. (2018). Os autores realizaram estudos sobre a penetração de cloro em argamassas contendo diferentes tipos de argilas cauliníticas. De acordo com os autores, teores de 30 a 50% de substituição de cimento Portland por argilas calcinadas resultaram em grande elevação da resistência à penetração de íons de cloro, aumentando a durabilidade das argamassas.

Já Antoni et al. (2012) realizaram pesquisas em argamassas utilizando substituições parciais de argilas calcinadas. Entre os traços analisados foram avaliadas as substituições parciais de cimento Portland por 15% de filler calcário (LS15) e 30% de argila calcinada (MK30). Os resultados da pesquisa demonstraram que um teor de substituição de 30% de cimento Portland por argila calcinada (metacaulim) resultou em um aumento da resistência à compressão da ordem de 20% aos 28 dias de idade, conforme aponta a Figura 2.8.

Nota-se que o traço contendo 30% de substituição de metacaulim (uma argila calcinada) resultou em um índice de desempenho de 104% aos 90 dias, ou seja, esse MCS conseguiu mais que compensar a remoção de 30% do cimento Portland.

Como já foi mencionado anteriormente, a argila calcinada utilizada nos estudos de Antoni et al. (2012) é o metacaulim. Este MCS é fruto de uma argila natural rica em caulinita e cujo processo de calcinação é rigidamente controlado, resultando em um MCS altamente pozolânica. Devido a isso, fica claro que o conhecimento do tipo de argila natural utilizado e o aperfeiçoamento do processo de calcinação são cruciais para a confecção de argilas calcinadas viáveis como substituições parciais.

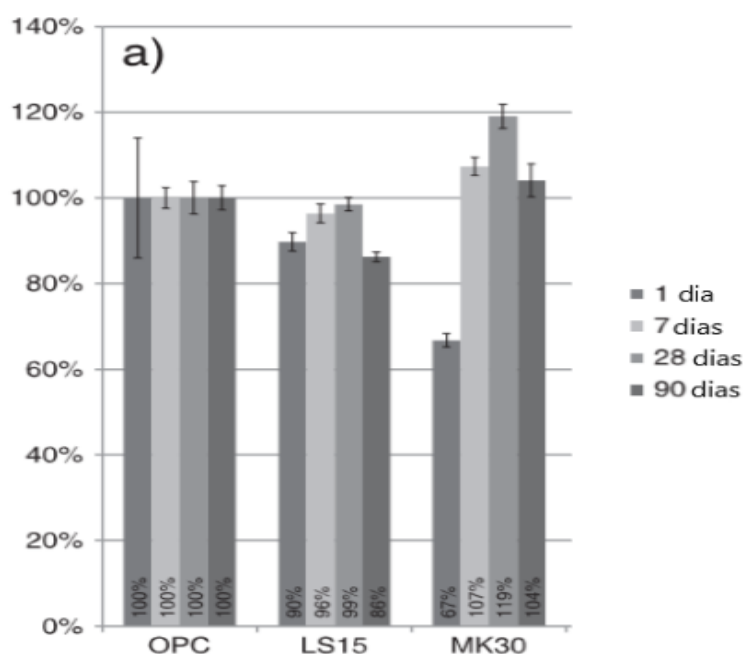


Figura 2.8- Índice de desempenho na resistência à compressão, em relação ao traço OPC (100% de cimento Portland) (ANTONI et al., 2012)

Fica claro que não há um teor ótimo comum de substituição a ser adotado para todos os tipos de argilas calcinadas. É necessário que se procedam pesquisas com as argilas in natura, argilas calcinadas e misturas cimentícias para que se determine o melhor teor de substituição para dada argila calcinada. Há uma escassez de pesquisas sobre o uso de argilas do Distrito Federal, com função de MCS, motivando esta pesquisa.

## 2.2 EFEITOS DO FÍLER SILÍCIO NO CIMENTO PORTLAND

O fíler silícico é um MCS não pozolânico, composto por com alto grau de cristalização, tornando o material quimicamente inerte. Segundo Rashad (2018), a maioria dos grãos de areia são compostos de mais de 95% de quartzo (material silícico em estado cristalino, inerte) podendo ser utilizados como fíler silícico.

Segundo Rashad (2018), o uso de adições de fíler silícico pode ser justificado pela sua capacidade de reduzir o consumo de energia durante a produção do cimento Portland, assim como pelo potencial de redução da emissão de gases poluentes como o CO<sub>2</sub>.

Enquanto as argilas calcinadas alteram o comportamento de materiais por meios físicos e químicos (TIRONI et al., 2014b), o fíler silícico atua apenas por meio de efeitos físicos (DE LA VARGA et al., 2018). Os efeitos físicos podem ser separados em 3 categorias: efeito fíler; efeito de diluição; e efeito de nucleação, estes podem afetar consideravelmente as características de misturas contendo o cimento Portland, como as propriedades de resistência à compressão, trabalhabilidade e velocidade de hidratação do cimento Portland.

Segundo Gutteridge e Dalziel (1990) e Rashad (2018), partículas de fíler inerte podem atuar amplificando o grau de hidratação da pasta de cimento nas primeiras idades da mistura. De acordo com os autores, as partículas de fíler atuam como pontos de nucleação para os compostos do cimento Portland, facilitando a formação dos produtos de hidratação do cimento.

Cyr et al. (2005) confirma os resultados de Gutteridge e Dalziel (1990). O autor afirma que a substituição parcial de cimento Portland por fíler silícico resulta na aceleração do processo de hidratação do cimento, entretanto foi constatado que um aumento nos teores de substituição não gerou elevação proporcional na hidratação da pasta de cimento.

Wang et al. (2013) afirma que o grau de hidratação de pastas de cimento com adições de 20% de fíler silícico aumentou em relação ao traço de controle, aos 28 dias. Os fíleres utilizados apresentaram superfície específica de 1300, 400 e 240 m<sup>2</sup>/kg. Quanto maior a finura apresentada pelo MCS, maior o efeito de nucleação, e devido a isso maior foi a elevação do grau de hidratação em relação ao traço de referência.

Segundo Rahhal e Talero (2009), adição de materiais não-hidráulicos (inertes) em materiais cimentícios resulta em aumento da velocidade de hidratação do cimento, devido ao efeito de nucleação. De acordo com os autores, o fíler silícico utilizado (nomeado na pesquisa como Quartz) não apresentou atividade pozolânica devido ao fato de suas moléculas estarem em estado cristalino.

De La Varga et al. (2018) realizou estudos com argamassas e constatou que quanto maior a superfície específica do fíler utilizado, maior a aceleração da hidratação, e por consequência maior a liberação de calor.

No estudo foi utilizada uma relação água/aglomerante de 0,3, os traços utilizados foram: traço referência sem MCS (M1), 40% de substituição de cimento Portland por escória de alto forno (M2), 40% de substituição de fíler silícico (M5) e M8, que representa um traço sem qualquer MCS, porém com uma relação a/c de 0,47.

O traço M8 foi adotado na pesquisa em questão devido ao fato de que a microestrutura de sua matriz cimentícia, em termos de espaçamento dos grãos de clínquer, se assemelha em muito à microestrutura dos traços M5 e M2. Esse fato pode ser explicado por um dos efeitos físicos dos MCS já mencionado anteriormente, o efeito de diluição. Este efeito consiste na elevação do espaçamento entre os grãos de clínquer devido à adição de um MCS, resultando em um espalhamento dos grãos de clínquer similar a um traço com relação a/c consideravelmente superior à relação a/c real (conforme ilustrado na Figura 2.3).

De La Varga et al. (2018) realizou ensaios de análise térmica (TG/DTA) nos traços previamente mencionados. O autor plotou a liberação de calor adicional de cada um dos traços em relação ao traço M1. Essa liberação de calor extra de cada traço foi atribuída a um efeito físico e/ou químico a depender do traço em questão. Segundo o autor, todo o calor que o traço M8 liberou acima do liberado por M1 corresponde ao efeito de diluição (espaçamento) dos grãos de clínquer, que segundo o autor, aumenta o espaço entre partículas de clínquer acelerando a hidratação. Já a diferença de calor entre M5 e M8 pode ser atribuída ao efeito de nucleação do fíler, tendo em vista que o espaçamento entre os grãos de clínquer é o mesmo nos dois traços e o MCS utilizado em M5 é o fíler inerte. Por fim, como o M2 e M5 possuem MCS com a mesma granulometria e o mesmo teor de adição (portanto o mesmo espaçamento entre os grãos de clínquer), a diferença entre a liberação de calor dos traços se dá pelo efeito pozolânico da escória de alto forno constante no traço M2. A Figura 2.9 apresenta os resultados obtidos no ensaio de análise térmica (TG/DTA) pelos autores do estudo.



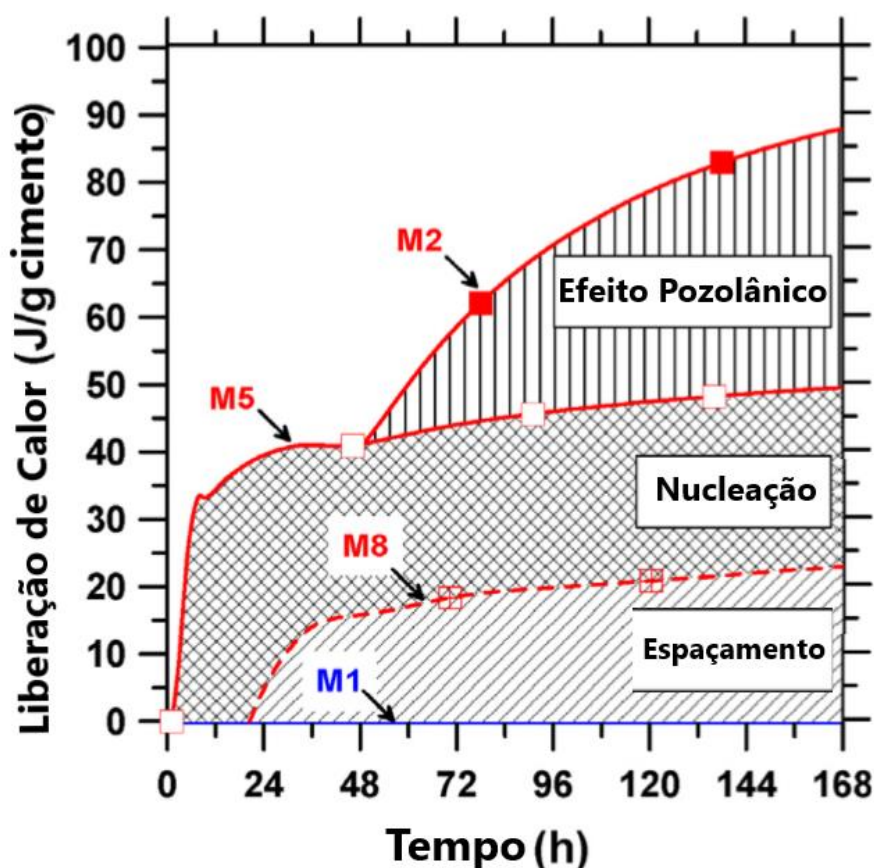


Figura 2.9 - Calor adicional (com relação a M1) liberado devido ao efeito de espaçamento, de nucleação e pozolânico (DE LA VARGA et al., 2018) - ADAPTADO

Dessa forma, De La Varga et al. (2018) conseguiu indicar as parcelas de calor correspondentes a cada um dos efeitos do fíler (espaçamento e nucleação) e de um MCS pozolânico (reação pozolânica de escória de alto forno). Ao se analisar o gráfico fica claro que a maior liberação de calor é fruto da hidratação do cimento, que por sua vez está sendo acelerada pela ação do fíler (ou da escória de alto forno no traço M2).

É possível verificar que é consenso na literatura que caso o fíler possua material em estado não-amorfo (cristalino) este material não reagirá quimicamente, apresentando apenas efeitos físicos (nucleação, diluição e de preenchimento de vazios). Além dos efeitos previamente mencionados na velocidade de hidratação do cimento, há também os efeitos em propriedades do estado fresco do material, conforme apresentado a seguir.

De acordo com Modler et al. (2007), MCS inertes (como o fíler silícico) são utilizados para fornecer melhor coesão e viscosidade no estado fresco de materiais cimentícios, para refinamento dos poros da pasta de cimento hidratada e melhorar o desempenho e a resistência ao ataque de agentes agressivos.

Já segundo Tikkanen et al. (2014), teores de substituição de 10 a 40% de cimento Portland por fíler silícico rico em quartzo resultaram em melhora na trabalhabilidade de concretos. Foi apresentado aumento no espalhamento do Slump Test de 230% para o teor de 10% de substituição.

Rashad (2018) e Fennis et al. (2009) atribuem o aumento da trabalhabilidade de materiais cimentícios com adições de fíler silícico rico em quartzo à dimensão reduzida das partículas do fíler, que conseguem preencher os vazios entre os grãos de cimento, diminuindo a água necessária para preencher esses vazios.

Fica claro que todos os efeitos mencionados dependem puramente das características físicas (granulometria, formato das partículas, teor de substituição) do fíler utilizado. Portanto, caso se molde um traço de argamassa com um teor de substituição de cimento Portland por fíler silícico e esta seja ensaiada à compressão, e se repita o procedimento com o mesmo teor de substituição com um MCS pozolânico com a mesma granulometria, a diferença entre os resultados de resistência obtidos (entre o traço com fíler e o com pozolana) pode ser atribuída às reações pozolânicas, de forma que ficam claros os efeitos físicos e químicos do MCS pozolânico.

É importante ressaltar que para que tal comparação possa ser válida é essencial que as características físicas do MCS sejam as mais próximas possíveis das do fíler silícico. Isto para que o comportamento físico de ambos os materiais seja similar nas misturas cimentícias a serem analisadas.

Esta estratégia é utilizada em diversos trabalhos na literatura. Antoni et al. (2012), Alhozaimy et al. (2012), De La Varga et al. (2018) e Flores et al. (2017) utilizaram adições de fíler silícico em misturas cimentícias de suas pesquisas para analisar o efeito físico de outros MCS. Os trabalhos destes autores reforçam, por meio de testes de difratometria de raios-X (DRX), análise térmica (TG/DTA), Teste de Fratini ou ensaios de resistência à compressão que o fíler silícico não atua quimicamente, agindo apenas por efeitos físicos.

Flores et al. (2017), realizou estudos em pastas de cimento contendo fílers silícicos com duas granulometrias diferentes, utilizando teores de substituição de 2,5%. Os resultados obtidos na pesquisa mencionada indicam que nenhuma das duas adições possuiu efeitos pozolânicos, e que a elevação da finura do fíler resulta em diminuição da trabalhabilidade das pastas analisadas. Não foram apresentadas diferenças significativas, em relação ao traço

referência, nos valores de resistência à compressão dos traços contendo fíler. Entretanto foi constatado que o traço contendo a adição de fíler mais fina resultou em um valor de compressão 13% superior ao do fíler menos fino.

Alhozaimy et al. (2012) realizou ensaios de resistência à compressão em argamassas com teores de 10 a 40% de substituição de cimento Portland por um fíler silícico advindo de pó de areia. Conforme pode ser observado na Figura 2.10, quanto maior o teor de substituição utilizado, maior a queda do valor da resistência das misturas. Esse comportamento pode ser explicado pela elevação da quantidade de moléculas quimicamente inertes na mistura (fíler silícico) em detrimento da queda da concentração de clínquer na mistura, componente quimicamente reativo responsável pela produção do C-S-H no cimento Portland.

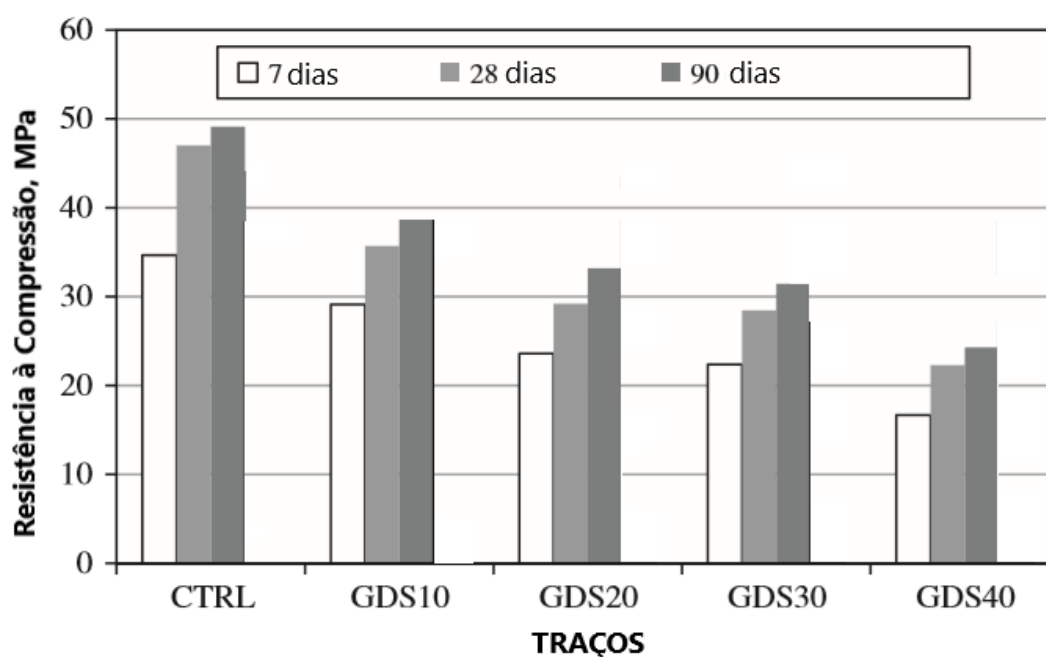


Figura 2.10 - Resistência à Compressão de Argamassas GDS10, GDS20, GDS30 e GDS40, com 10, 20 30 e 40% de fíler silícico, respectivamente (ALHOZAIMY et al., 2012) - ADAPTADO

Antoni et al. (2012) realizaram pesquisas em argamassas com MCS e utilizaram fíler silícico (composto primariamente por quartzo) para comparação do efeito físico em diferentes teores de substituição do cimento Portland. Os traços analisados foram os seguintes: traço referência (OPC), substituição de 15% de fíler calcário (LS15), 30% de metacaulim (MK30), e misturas contendo 15, 30, 45 e 60% de combinações de metacaulim e fíler calcário, na proporção 2:1, (MK-B15, MK-B30, MK-B45 e MK-B60). Estes traços foram comparados

com argamassas contendo as mesmas proporções de substituição de fíler silícico, conforme apresenta a Figura 2.11.

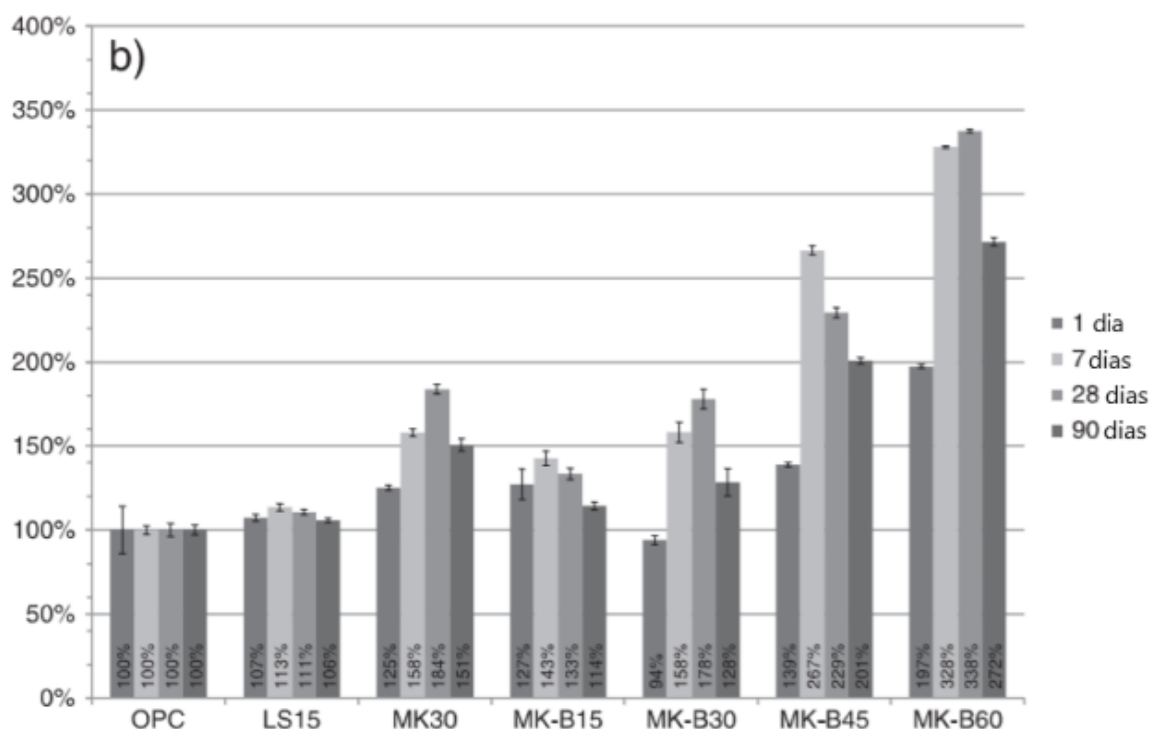


Figura 2.11- Índice de desempenho na resistência à compressão, em relação à substituições equivalentes de fíler silícico (ANTONI et al., 2012)

Todos os traços contendo argilas calcinadas demonstraram índice de desempenho superior a 150% em relação aos traços contendo a mesma quantidade de substituição de fíler silícico, isso devido ao fato de que este é inerte, não reagindo com os produtos de hidratação do cimento e sendo responsável apenas por um efeito físico nas argamassas. Como demonstrado neste estudo, para o teor de substituição utilizado, o efeito físico não é capaz de compensar a queda da concentração de cimento Portland nos traços, e o seu uso tem resultados consideravelmente inferiores ao uso de MCS.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo tratará da metodologia adotada neste trabalho. Serão abordadas as 3 etapas relacionadas a ensaios laboratoriais da pesquisa: Produção do fíler silícico (FS) e das argilas calcinadas (ACA e ACB), Caracterização dos materiais e Avaliação do Índice de desempenho das argamassas. As etapas da pesquisa são explicitadas na Figura 3.1.

Serão detalhadas as características (comerciais e de fornecimento) dos materiais, o processo de produção do fíler silícico e das argilas calcinadas, a caracterização química e física desses materiais, a mistura das argamassas, dos ensaios realizados e o tratamento estatístico dos dados obtidos. A metodologia adotada foi definida de acordo com a estrutura fornecida pelos laboratórios da UnB e do IFG (Instituto Federal de Goiás – Campus Formosa), o período de tempo disponível para a pesquisa e os materiais concedidos (tanto por meio de doações quanto por meio da disponibilidade do mercado).

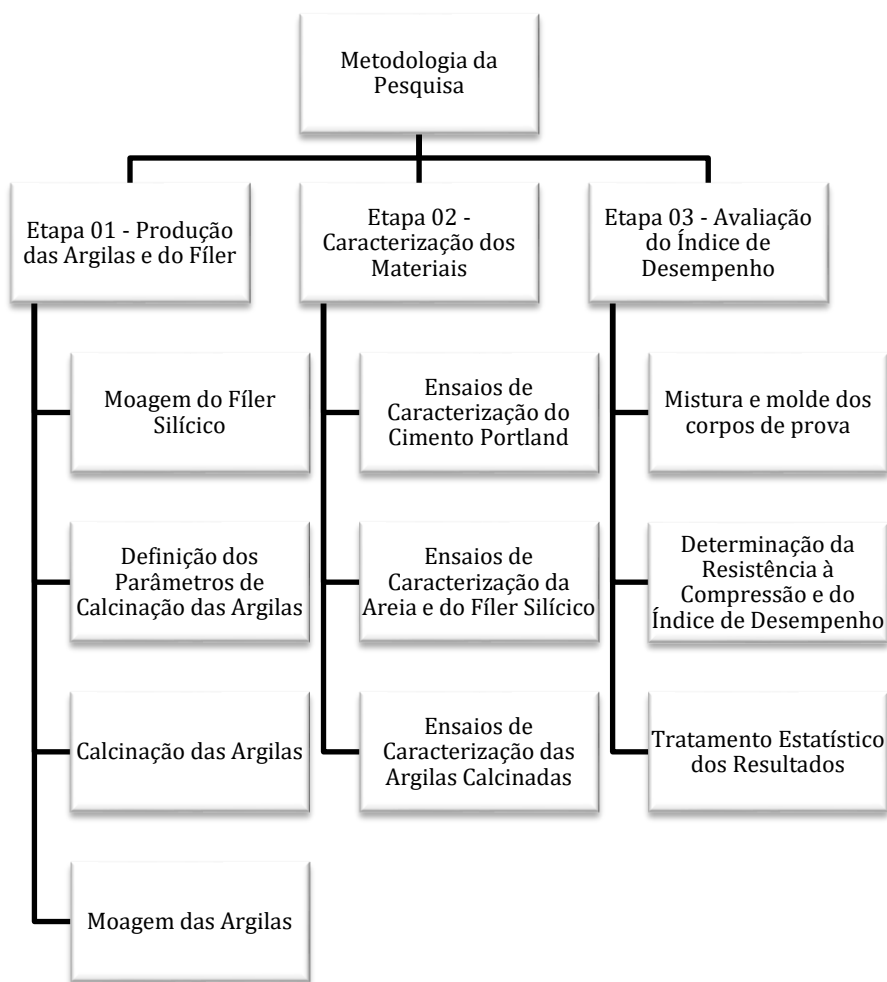


Figura 3.1 -Fluxograma geral da metodologia de pesquisa.

### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa para a produção das argamassas foram: cimento Portland Tipo I, areia normal, aditivo superplastificante, água e MCS (a depender do traço analisado). A seguir são detalhadas as especificações dos materiais utilizados no trabalho:

- Cimento Portland Tipo I 40 (CP I): O cimento Portland utilizado na pesquisa foi o cimento Portland Tipo I - Poty da Votorantim. Foi escolhido o CP I por ser o tipo de cimento com maior quantidade de clínquer.
- Areia: Neste trabalho foi utilizada a Areia Normal Brasileira do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Foram utilizadas quatro frações (fina, médio-fina, médio-grossa e grossa) de mesma proporção em todos os traços estudados neste trabalho, atendendo as especificações da NBR 7214 (ABNT, 2015).
- Água: Foi utilizada a água fornecida pela concessionária local, a Companhia de Saneamento de Goiás (Saneago).
- Aditivo Superplastificante (SP): Foi adotado o aditivo superplastificante Viscocrete 6900 nesta pesquisa, para garantir que todos os traços estudados apresentem consistência e trabalhabilidades semelhantes, a fim de garantir mesmas condições de moldagem para todos os corpos de prova a serem moldados. Segundo as informações do fabricante, este aditivo apresenta pH de  $5,5 \pm 1$ , densidade de  $1,10 \pm 0,02$  kg/litro e sua dosagem recomendada é de 0,3% a 1,8% sobre a massa de aglomerantes na mistura.
- Fíler Silícico (FS): Foi produzido um fíler silícico a partir da moagem da areia normal, para ser utilizado como substituição parcial do CP I e a fim de se comparar seus efeitos com os outros MCS avaliados neste trabalho.
- Argila A: A Argila A é advinda da região do entorno do DF. O material natural passou por um processo de calcinação com parâmetros de tempo e temperatura de queima que resultaram em estrutura molecular com efeito pozolânico e em seguida passou por moagem em moinho de bolas. Ao fim deste processo o material se tornou a Argila Calcinada A (ACA).

- Argila B: Esta argila é material natural presente na região do DF. Foi elaborado um processo de calcinação para a argila B, de forma que foram encontrados parâmetros de tempo e temperatura de queima que resultem em uma estrutura molecular com potencial pozolânico, além de um processo de moagem similar ao da argila A. Após o tratamento térmico e de moagem, a argila B foi convertida em Argila Calcinada B (ACB).

### **3.2 ETAPA 01 - PRODUÇÃO DO FÍLER SILÍCIO E DAS ARGILAS CALCINADAS**

Nesta etapa foram produzidas as argilas calcinadas ACA e ACB, além do fíler silício (FS) utilizados como MCS na pesquisa. A determinação e controle dos parâmetros utilizados na moagem e/ou calcinação de cada um desses materiais foi essencial para a produção de materiais com as características almejadas.

Um processo de produção que resulte em materiais com granulometrias similares e argilas com alto grau de amorficidade possibilitará a averiguação com precisão considerável da influência, tanto do tipo de MCS quanto do efeito pozolânico deste (caso este possua), na no índice de desempenho na compressão das argamassas.

#### **3.2.1 PRODUÇÃO DO FÍLER SILÍCIO (FS)**

O fíler foi produzido a partir da moagem em moinho de bolas da Faixa Grossa da Areia Normal, sendo esta atendente ao constante na NBR 7214 (2015). A curva granulométrica resultante deste processo foi adotada como modelo almejado na produção das Argilas Calcinadas. Dessa forma, será possível avaliar tanto o efeito físico quanto o pozolânico de ACA e ACB ao se comparar seus resultados de resistência à compressão com os deste fíler. A moagem da areia foi realizada no moinho de bolas do INFRALAB/UnB com 12 esferas metálicas e utilizando 4 kg da Faixa Grossa da Areia Normal por moagem.

Foram testados períodos de moagem para a areia normal variando de 4 a 8 horas totais. Após análise dos resultados das curvas granulométricas por meio de ensaios de Granulometria à Laser se optou por utilizar uma moagem de areia por 7 horas para a produção do fíler silício, isso porque este tempo de moagem resultou em um fíler com Diâmetro Médio das partículas próximo ao do cimento Portland utilizado. Os ensaios de Granulometria à Laser que foram utilizados na definição deste tempo de moagem e dos

diâmetros médios dos materiais são apresentados na Figura 4.1 e na Tabela 4.3 durante a explanação da caracterização dos materiais deste estudo.

### **3.2.2 PRODUÇÃO DAS ARGILAS CALCINADAS (ACA E ACB)**

As argilas naturais utilizadas para a produção de ACA e ACB passaram por queima controlada, em forno tipo mufla no IFG. A composição mineralógica das argilas foi realizada por meio dos ensaios de Difração de Raios-X (DRX) e de Fluorescência de Raios-X (FRX).

#### **3.2.2.1 DEFINIÇÃO DA TEMPERATURA DE CALCINAÇÃO**

Segundo Tironi et al. (2014b) a temperatura de calcinação de argila cauliníticas vai de 550 a 900 °C (temperatura média de 725 °C), já Mehta e Monteiro (2014) indicam um intervalo de 600 a 900 °C (temperatura média seria de 750 °C) enquanto a NBR 12653 (ABNT, 2014) apresenta temperaturas de 500 a 900 °C (temperatura média de calcinação de 700 °C) para argilas com potencial pozolânico. Tendo estes valores em vista, e considerando que as argilas utilizadas neste trabalho tem natureza caulinítica, foi adotado o valor de 750 °C para a temperatura de calcinação das argilas naturais A e B, tal valor ultrapassa o valor médio de 725 °C, garantindo maior desidroxilação das moléculas dentro da mufla onde ocorre o tratamento térmico. Além disso, a temperatura utilizada ainda se encontra dentro dos intervalos adequados para calcinação mencionados na literatura.

As argilas ACA e ACB foram calcinadas à temperatura controlada de 750 °C na mufla do Laboratório de Materiais do IFG/Formosa durante 2 horas. Após este período, o material passou por um processo de resfriamento não controlado, ou seja, as amostras ficaram em repouso no recipiente em que foram calcinadas até atingir a temperatura ambiente  $\pm 25$  °C.

#### **3.2.2.2 MOAGEM DAS ARGILAS CALCINADAS**

As argilas calcinadas foram moídas no moinho de bolas do LEM/UnB (Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília) até que suas curvas granulométricas se aproximarem da do Fíler Silícico, com diâmetro médio das partículas e diâmetros de 10%, 50% e 90% próximos aos do fíler. A moagem se deu com 15 esferas de aço e 4 kg de argila calcinada por ciclo de moagem. Após análise com diversos tempos de moagem, foi concluído que os melhores resultados foram apresentados quando as argilas foram moídas por 4 horas, tal afirmação será justificada durante a Etapa 02 da metodologia, mais especificamente nos ensaios de BET e Granulometria à Laser.



Desta forma os MCS analisados apresentaram comportamento físico similar e superfície específica semelhante entre as argilas calcinadas, de modo que as argamassas moldadas com adições de ACB e ACA puderam ser comparadas com as argamassas contendo F.

### 3.3 ETAPA 02 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A etapa de caracterização dos materiais é de fundamental importância para a compreensão dos efeitos que os MCS avaliados exercem sobre as argamassas estudadas. Foram caracterizados o CPI, o fíler silícico (FS), as argilas calcinadas (ACB e ACA), a areia normal e o aditivo superplastificante através dos ensaios mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Resumo da caracterização dos materiais

Materiais		Cimento	Fíler	ACA	ACB	Areia
Ensaio	Massa Específica	X	X	X	X	X
	DRX	X	X	X	X	
	FRX	X	X	X	X	
	Resistência à Compressão	X	-	-	-	
	Granulometria a Laser	X	X	X	X	
	BET	X	X	X	X	
	MEV	X	X	X	X	

Além disso, é apresentado um fluxograma especificando a realização dos ensaios utilizados na caracterização dos materiais, conforme apresenta a Figura 3.2. Em seguida, serão detalhados os ensaios realizados nesta etapa do trabalho.

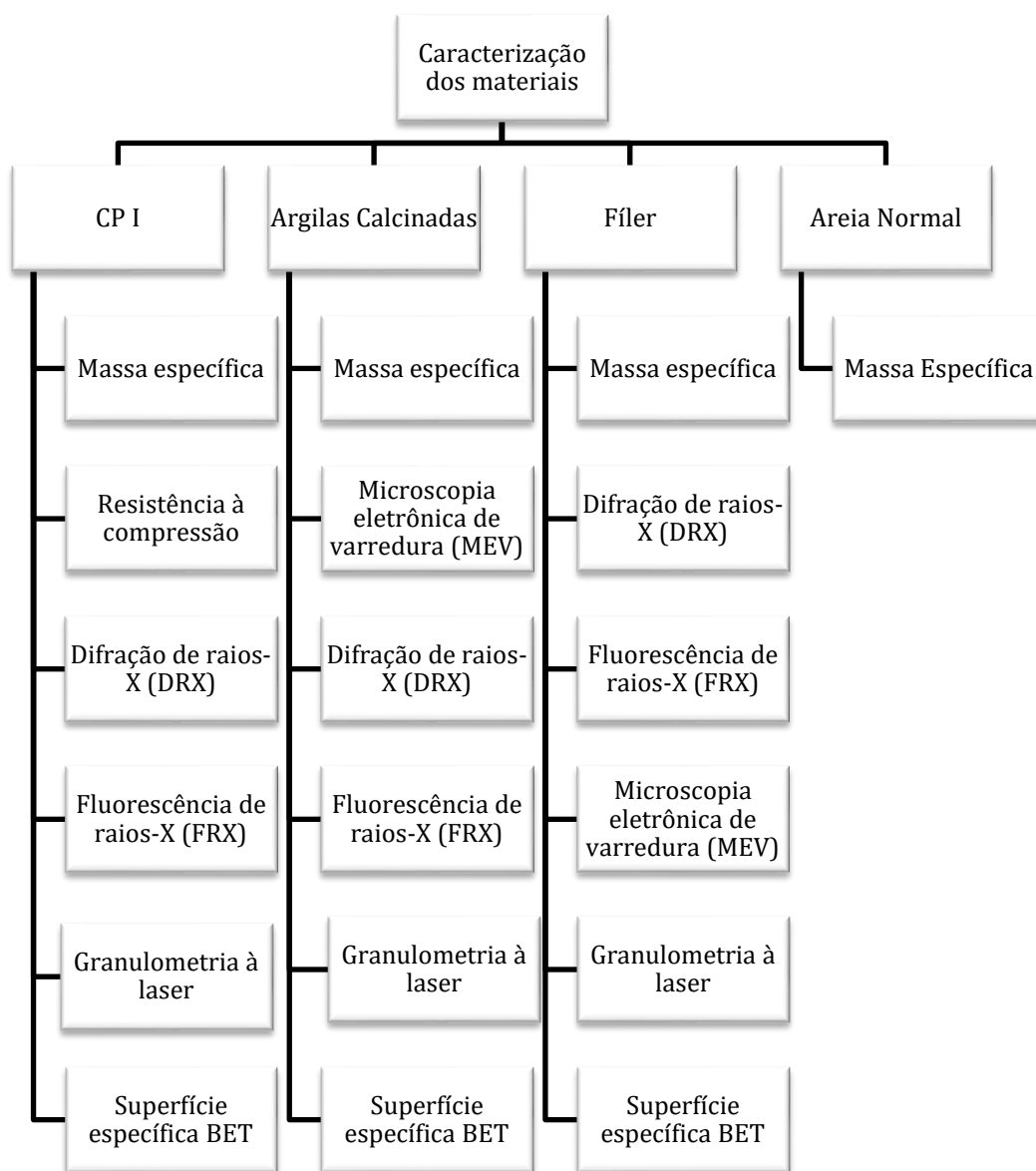


Figura 3.2 - Fluxograma de caracterização dos materiais

### 3.3.1 MASSA ESPECÍFICA

A massa específica do CP I foi determinada com o frasco de Le Chatelier conforme diretrizes da ABNT NBR NM 23 (2000) e a massa específica da areia foi determinada de acordo com a ABNT NBR 9776 (1987), ambos procedimentos realizados no LEM/UnB. Já as massas específicas das argilas calcinadas (ACA e ACB) e do fíler silícico foram determinadas por meio de ensaios no Laboratório de Geotecnia da UnB com um pentapicnômetro Pentapyc 5200e – Quantachrome Instruments.

### **3.3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CIMENTO PORTLAND**

A determinação da resistência à compressão do cimento Portland foi realizada conforme o estabelecido pela ABNT NBR 7215 (1997). Este ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais do IFG/Formosa.

### **3.3.3 GRANULOMETRIA À LASER**

A granulometria a laser foi realizada para avaliar a distribuição granulométrica das argilas, do cimento Portland e do fíler, que influenciam diretamente na reatividade destes materiais. O ensaio foi utilizado para determinar o tempo de moagem do fíler silícico e avaliar a similaridade entre a distribuição granulométrica dos três MCS utilizados (F, ACA e ACB) ao fim dos seus processos de produção. Os ensaios foram realizados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul utilizando defloculante para a determinação da curva granulométrica.

### **3.3.4 SUPERFÍCIE ESPECÍFICA BET**

A caracterização das argilas calcinadas por meio da determinação da superfície específica BET é de extrema importância, pois a superfície específica está diretamente associada com a reatividade desses materiais. Esse ensaio consiste na adsorção física de moléculas de hidrogênio sobre a superfície do material analisado, resultando em um parâmetro de medida da superfície específica. Os ensaios foram realizados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

### **3.3.5 ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)**

Este ensaio foi realizado com o foco de identificar e quantificar os elementos químicos presentes no CP I, nas argilas calcinadas e no fíler silícico. O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaio da empresa CIPLAN, para o CPI e na Central Analítica do Instituto de Química da UnB para os demais materiais.

### **3.3.6 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)**

O ensaio de difração de raios-X (DRX) foi realizado nas argilas calcinadas, para avaliar o grau de amorfismo destas, e no CP I para identificar os compostos das fases cristalinas. O ensaio foi realizado no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (IG/UnB), com o difratômetro BRUKER D8 Advance, com voltagem de 40 kV e amperagem de 40 mA, em sistema  $\theta/2\theta$ , com velocidade de varredura de 1,2°/minuto, de 5° a 60° em 2 $\theta$ .

A fonte de energia é um filamento de tungstênio (cátodo) e o tubo de raios-X foi de cobre (ânodo), cujos comprimentos de onda são  $K\alpha$  1,5406 Å e  $K\beta$  1,3922 Å.

### **3.3.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)**

O ensaio foi realizado no Laboratório de Geocronologia da UnB, no microscópio eletrônico de varredura modelo Quanta 450. A varredura se deu por meio de feixe de elétrons que escaneiam a superfície da amostra. As imagens fornecidas pelo MEV auxiliarão na análise do tamanho e morfologia das partículas das argilas calcinadas, do fíler silícico e do cimento Portland.

## **3.4 ETAPA 03 - AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO À COMPRESSÃO**

Foram realizados ensaios de resistência à compressão, e com estes resultados foi avaliado o índice de desempenho dos traços analisados, de forma que se averiguar os efeitos das adições de argila calcinada estudadas. Neste tópico serão detalhados os procedimentos adotados no preparado das argamassas, ensaios de resistência à compressão, avaliação do índice de desempenho das misturas e sua análise estatística.

### **3.4.1 PREPARO DAS ARGAMASSAS**

Neste trabalho foram produzidos 10 traços de argamassas, onde foram variados os teores de substituição de cimento Portland por fíler (FS), argila calcinada A (ACA) e argila calcinada B (ACB). Foram adotados teores de substituição de cimento Portland por MCS de 15, 25 e 35% em massa. O espalhamento da argamassa na Mesa de consistência foi fixado em  $197 \pm 10$  mm e a relação água-aglomerante em 0,48. O traço aglomerante/areia/água foi fixado em 1:3:0,48, segundo a NBR 7215 (ABNT, 1997).

O valor de substituição de 25% em massa foi adotado por ser o teor especificado na NBR 5752 (ABNT, 2014), norma que define os parâmetros para a determinação do índice de desempenho na resistência à compressão de argamassas com uso de substituição parcial de materiais pozolânicos. Já os teores de 35% e 15% (em massa) foram escolhidos para se realizar uma análise de qual seria o melhor teor de substituição a ser utilizado nas argamassas para os MCS utilizados na pesquisa.

A Tabela 3.2 apresenta a composição de cada um dos traços a serem analisados nesta pesquisa.

Tabela 3.2– Nomenclatura e composição dos traços analisados

Traço	Composição
REF	100% Cimento Portland Tipo I (CP I)
F15	85% CPI + 15% Fíler Silícico
A15	85% CPI + 15% Argila Calcinada A
B15	85% CPI + 15% Argila Calcinada B
F25	75% CPI + 25% Fíler Silícico
A25	75% CPI + 25% Argila Calcinada A
B25	75% CPI + 25% Argila Calcinada B
F35	65% CPI + 35% Fíler Silícico
A35	65% CPI + 35% Argila Calcinada A
B35	65% CPI + 35% Argila Calcinada B

A Tabela 3.3 apresenta o quantitativo de material necessário para a moldagem de 6 corpos de prova de argamassa. Nota-se que o teor de aditivo superplastificante foi variado em cada traço de forma a manter o espalhamento em função do espalhamento do traço REF (com apenas CPI).

Tabela 3.3 – Quantitativo de materiais para moldagem de 6 corpos de prova

Composição								
Traço	Cimento [g]	Areia [g]	FS [g]	ACA [g]	ACB [g]	Água [g]	Superplastificante	
							[g]	[%]
REF	624,0	1872	-	-	-	249,6	-	-
F15	530,4	1872	93,6	-	-	249,6	-	-
A15	530,4	1872	-	93,6	-	249,6	3,432	0,55%
B15	530,4	1872	-	-	93,6	249,6	3,432	0,55%
F25	468,0	1872	156,0	-	-	249,6	-	-
A25	468,0	1872	-	156,0	-	249,6	2,496	0,40%
B25	468,0	1872	-	-	156,0	249,6	6,240	1,00%
F35	405,6	1872	218,4	-	-	249,6	-	-
A35	405,6	1872	-	218,4	-	249,6	4,056	0,65%
B35	405,6	1872	-	-	218,4	249,6	6,552	1,05%

O processo de mistura das argamassas se deu em um misturador planetário (Figura 3.3) seguindo o especificado pela ABNT NBR 7215 (1997) e foi realizado no Laboratório de Materiais do IFG/Formosa.



Figura 3.3 - Misturador planetário utilizado no IFG/Formosa

Inicialmente é adicionada a água de amassamento juntamente com o aditivo superplastificante na cuba, em seguida o CP I é depositado no recipiente e se inicia a mistura por 30 segundos na velocidade baixa. Em seguida, é adicionada a areia normal (com todas suas faixas granulométricas previamente misturadas) sem interromper o processo de mistura, durante um período de 30 segundos. Após toda a areia ser adicionada à mistura a velocidade de mistura é aumentada para a velocidade alta por mais 30 segundos. Em seguida o misturador planetário é desligado por 1 minuto e 30 segundos para que a mistura fique em repouso. Depois disso o misturador é religado por 1 minuto na velocidade alta, finalizando a mistura. É importante ressaltar que durante o processo de mistura foi mantido um pano úmido sobre a cuba para minimizar a perda de água para o ar.

Ao fim do processo de mistura, as argamassas foram submetidas ao ensaio da Mesa de Consistência a fim de verificar se o espalhamento se encontra no intervalo de  $197 \pm 10$  mm.

No caso do espalhamento encontrado se encontrar no intervalo estipulado, são moldados os corpos de prova de 50 x 100 mm para o traço. Estes foram armazenados em câmara úmida no IFG por 24 horas e após isso foram submetidos à cura submersa até a sua idade de rompimento e foram respeitadas as tolerâncias estabelecidas para cada idade pela ABNT NBR 7215 (1997), como apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Limites de tolerância de tempo de ruptura dos corpos de prova (ABNT NBR 7215, 1997)

Idade	Tolerância
24 horas	± 30 minutos
3 dias	± 1 hora
7 dias	± 2 horas
28 dias	± 4 horas
91 dias	± 1 dia

Os corpos de prova foram retificados no dia de seu rompimento na retífica do IFG/FORMOSA. O rompimento dos espécimes se deu na prensa EMIC GR048 do próprio laboratório (Figura 3.4), com capacidade de carga máxima de 300kN,



Figura 3.4 - Prensa EMIC GR048 do IFG/Formosa

### 3.4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A fim de verificar o desempenho mecânico, foi realizado ensaio de resistência à compressão, conforme o indicado na NBR 7215 (ABNT, 1997). Foram utilizados corpos de prova cilíndricos, de diâmetro de 50mm e altura de 100mm, foram ensaiados à compressão 4 corpos de prova por traço, nas idades de 1, 3, 7, e 28 dias. Dessa forma foram moldados 16 corpos de prova por traço, totalizando 176 corpos de prova.

### 3.4.3 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE DESEMPENHO

As normas NBR 5752 (ABNT 2014), NBR 15894-2 (ABNT, 2010), NBR 13956-3 (ABNT, 2012) determinam os parâmetros e procedimentos para a realização de ensaios de índice de desempenho em cimento Portland com materiais pozolânicos, Metacaulim e Sílica Ativa respectivamente. Todas estas normas determinam que os traços devem ter fixação da relação água/cimento e uso de superplastificante para manter o espalhamento (critérios que constam na metodologia deste trabalho).

É importante ressaltar que as normas citadas anteriormente são válidas apenas para teores fixos de substituição parcial do cimento e idades específicas (que variam em cada uma das normas). Diante disso, será utilizada uma adaptação destas normas, para avaliar o índice de desempenho das argamassas analisadas nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias, com os teores de substituição de 15, 25 e 35% de cimento Portland por MCS. Para o cálculo do índice, foram utilizados os resultados de resistência à compressão obtidos conforme descrito no item 3.4.2 deste trabalho.

O índice de desempenho (I) para cada idade foi calculado conforme a Equação 3.1. Onde REF representa a resistência à compressão média do traço REF na idade em questão e T representa o valor médio de resistência à compressão do traço cujo índice de desempenho se busca calcular (na idade avaliada). Os resultados permitirão avaliar o efeito pozolânico dos diferentes MCS utilizados na pesquisa na resistência à compressão de argamassas.

$$I = \frac{T}{REF} \quad (3.1)$$

#### **3.4.4 PROPOSTA PARA DETERMINAÇÃO DOS EFEITOS POZOLÂNICO E FÍSICO**

O cálculo da resistência adquirida pelas argamassas devido aos efeitos pozolânico (EP) e físico (EF) das argilas calcinadas A e B foi realizado de acordo com duas hipóteses adotadas nesta pesquisa. Estas hipóteses são as seguintes: o fíler silícico apresenta apenas efeito físico na mistura cimentícia; e os três MCS apresentam efeitos físicos similares nos sistemas cimentícios. A partir disso, a resistência à compressão apresentada por um traço será dividida em 3 parcelas: uma relativa à influência do clínquer; outra à do efeito físico de um MCS; e a terceira referente ao efeito pozolânico deste mesmo MCS.

A parcela de resistência à compressão relativa à influência do clínquer em um traço com 100% de CPI (REF) representará toda a resistência apresentada pelo material. Dessa forma, caso se retire um teor X% de clínquer e adicione um MCS, a influência do clínquer (EC) será considerada de (1-X%) vezes a resistência do traço REF, conforme apresenta a Equação 3.2. Ou seja, ao se substituir 15% de CPI por um MCS, ao efeito do clínquer será atribuída a influência em 85% do valor de resistência do traço REF.



$$EC = REF \times (1 - X\%) \quad (3.2)$$

A partir das premissas citadas, o efeito físico da incorporação de um teor de X% de qualquer MCS deverá ser igual. Portanto, para se descobrir qual a influência do efeito físico na resistência à compressão de uma mistura (EF), será avaliada a diferença de valores de resistência à compressão entre a mistura contendo o teor X% de fíler silicico (FX) e o efeito relativo à influência do clínquer (EC) já citado anteriormente. Esse procedimento é explicitado pela Equação 3.3.

$$EF = FX - EC \quad (3.3)$$

Caso o resultado obtido pela Equação 3.3 resulte em valor inferior a zero, é apontado que a diminuição da concentração de clínquer na mistura foi mais relevante do que o efeito físico fornecido pelo MCS em questão. Caso contrário, o valor obtido indica o ganho de resistência à compressão relativo ao efeito físico de X% do material analisado, indicando que o efeito físico superou o a perda de clínquer na mistura.

Como já mencionado anteriormente, todos os MCS foram considerados apresentado o mesmo comportamento físico. Dessa forma, para uma mesma idade de análise, os valores de EF (variações de resistência à compressão relativas ao efeito físico) para todos os MCS só variarão com a variação do teor X% de substituição de CPI por MCS.

Já a parcela de resistência à compressão atribuída ao efeito pozolânico (EP) da incorporação das argilas calcinadas será determinada pela diferença entre a resistência total da mistura em questão (TX) e o somatório das parcelas relativas aos efeitos do clínquer (EC) e do efeito físico (EF) do MCS. Ressalta-se que é necessário levar em conta o mesmo teor X% de substituição e as mesmas idades de ruptura das misturas. O cálculo da influência do efeito pozolânico é apresentado na Equação 3.4.

$$EP = TX - (EF + EC) \quad (3.4)$$

Um procedimento análogo ao descrito pode ser utilizado para se avaliar o efeito físico e pozolânico dos MCS pozolânicos no Índice de Desempenho das misturas.

Destaca-se que este método pode medir a influência pozolânica efetivamente apresentada pelo material. Ou seja, esta metodologia não consegue mensurar os efeitos de

parcelas de MCS que podem não ter reagido efetivamente (por aglomeração ou carência de compostos para iniciar a reação), não sendo substituta de outros ensaios como o de Reatividade Pozolânica.

O processo descrito é similar ao utilizado por De La Varga et al. (2018) para desacoplar os efeitos físicos e químicos da incorporação de MCS em misturas cimentícias. Vale ressaltar que este também fez uso de fíler silício. Contudo, ressalta-se que esta metodologia ainda pode ser aprimorada, de forma a definir de forma mais precisa e acurada os efeitos físicos e pozolânicos dos materiais incorporados na mistura cimentícia.

### **3.4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA**

A fim de se avaliar a influência de cada MCS utilizado no estudo, em função dos diferentes teores de substituição adotados e do tipo de MCS (Fíler ou Argila Calcinada), foi realizada uma análise de variância dos dados de resistência à compressão. Nesta análise estatística serão avaliados apenas os resultados do rompimento dos corpos de prova com 28 dias de cura, haja vista que esta é a idade em que se avalia o índice de desempenho de cimentos, além de ser a idade de controle de concretos produzidos no Brasil.

A análise de variância fornecerá um grau de confiança para os resultados obtidos, relacionando as variáveis dependentes com as independentes, informando se existem diferenças estatisticamente relevantes entre os resultados apresentados com a variação destas. O nível de confiança adotado será de 95%, ou seja, caso uma hipótese considerada apresente nível de significância (p-valor) inferior a 5% esta será rejeitada, caso contrário será aceita.

Foi efetuado também o teste de Duncan, de forma a complementar a análise. Este teste tem como alvo a verificação de diferenças significativas entre as médias obtidas, de forma a realizar uma divisão dos dados em grupos, de acordo com as médias consideradas estatisticamente semelhantes. Dessa forma será possível avaliar quais misturas se comportam de forma similar na idade analisada (28 dias).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão analisados os resultados obtidos durante a caracterização dos materiais e ao fim dos ensaios de resistência à compressão das argamassas. Primeiramente será abordada a caracterização dos materiais, seguida pela análise do uso do aditivo superplastificante, e como este se relaciona com o efeito físico dos MCS no estado fresco das misturas. Em seguida, serão analisados os índices de desempenho dos traços estudados a fim de se avaliar tanto o efeito pozolânico quanto o físico de cada MCS utilizado. Além disso, ao fim será apresentada a análise estatística dos dados obtidos, categorizando as argamassas utilizadas.

### 4.1 RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Esta seção tratará dos resultados obtidos durante a caracterização dos materiais. Estes resultados são de primordial importância para se compreender o comportamento dos MCS utilizados nesta pesquisa.

#### 4.1.1 MASSA ESPECÍFICA

Os resultados obtidos de massa específica em cada um destes ensaios são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Massa Específica dos Materiais Utilizados

Material	Massa Específica [g/cm <sup>3</sup> ]
Cimento Portland	3,11
Areia Normal	2,618
Fíler Silícico - 7 horas de moagem	2,695
Argila Calcinada A - 4 horas de moagem	2,669
Argila Calcinada B - 4 horas de moagem	2,657

#### 4.1.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CIMENTO PORTLAND

Os resultados obtidos aos 1, 3, 7 e 28 dias são apresentados na Tabela 4.2. Nota-se que o cimento utilizado apresentou resistência de 35,53 MPa aos 28 dias, ou seja, 11,17% a menos do valor mínimo de 40 MPa exigido para um cimento Portland de categoria CP I 40. Tal resultado não impossibilita o estudo, apenas indicou uma qualidade aquém da esperada para o lote utilizado nesta pesquisa. Pode-se notar também que o cimento apresentou desenvolvimento acelerado de resistência até os 7 dias, entretanto os resultados obtidos indicam que entre os 7 e 28 dias o crescimento da resistência foi consideravelmente inferior.

Tabela 4.2 - Resultados de Resistência à Compressão do CP I 40 utilizado na pesquisa e limites mínimos segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018)

Idade	Resistência À Compressão [MPa]	
	CPI	Valor Normativo Mínimo para CP I - 40
1 dia	17,50	-
3 dias	21,50	15,00
7 dias	32,50	25,00
28 dias	35,53	40,00

### 4.1.3 GRANULOMETRIA À LASER

Os parâmetros utilizados para verificar a similaridade entre as curvas granulométricas dos diferentes materiais foram: Diâmetro Médio e os diâmetros a 10%, 50% e 90%. Dessa forma, ao se avaliar os diferentes tempos de moagem dos MCS utilizados, optou-se em utilizar os que apresentassem os parâmetros mais similares entre si, que no caso foram 7 horas de moagem para o fíler silícico se aproximar do CP I e 4 horas para ACA e ACB se aproximarem do fíler. Os valores encontrados para o Diâmetro Médio e os diâmetros a 10%, 50% e 90% para cada MCS são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resultados Obtidos nos ensaios de Granulometria à Laser (unidades:  $\mu$ )

Material	Diâmetro Médio	Diâmetro a 10%	Diâmetro a 50%	Diâmetro a 90%
Cimento Portland	21,65	2,19	20,17	42,60
Fíler Silícico - 7 horas de moagem	23,51	1,51	13,81	60,74
Argila Calcinada A - 4 horas de moagem	23,13	2,14	17,74	53,00
Argila Calcinada B - 4 horas de moagem	19,13	1,49	14,48	44,25

A Figura 4.1 apresenta a curva granulométrica do CP I utilizado, assim como de ACA, ACB e do FS. Em relação ao CPI, a imagem demonstra a elevada finura do material. Como mencionado durante o detalhamento do processo de produção do fíler silícico, foi adotado um tempo de moagem (7 horas) que resultasse em parâmetros físicos que se assemelhassem aos dos do CP I. O período de 7 horas de moagem do fíler silícico resultou na curva apresentada na Figura 4.1. De acordo com os parâmetros analisados, foi considerado que as duas curvas são similares o suficiente para este estudo.

Conforme descrito nos procedimentos relativos à Etapa 01 – Caracterização dos Materiais, a curva granulométrica de ACA e ACB deve se assemelhar à do fíler silícico para que seja viável a realização das análises propostas. As curvas de ACA e de ACB, ambas com 4 horas de moagem estão explicitadas na Figura 4.1, o período escolhido que melhor aproximou os parâmetros das duas com os da curva do fíler.

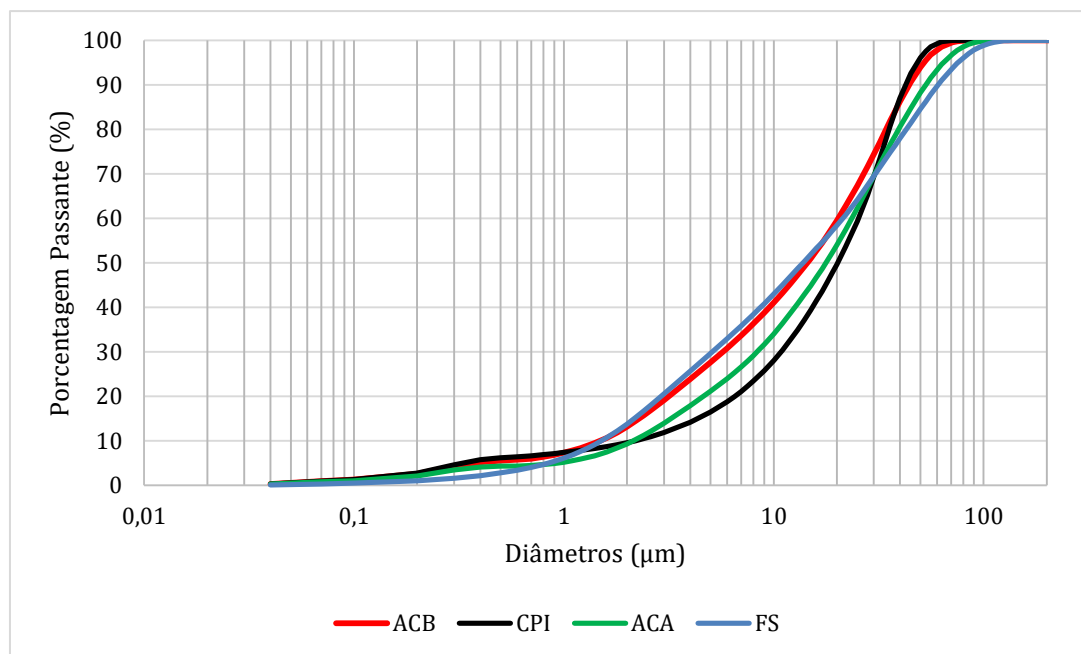


Figura 4.1 - Curvas Granulométricas do CPI, FS, ACA e ACB

As curvas detalhadas e isoladas de cada um dos materiais presentes na Figura 4.1 estão presentes no Apêndice A deste trabalho.

#### 4.1.4 SUPERFÍCIE ESPECÍFICA BET

Os resultados obtidos de superfície específica BET são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultados de BET dos Materiais

Material	Superfície Específica [m <sup>2</sup> /g]
Cimento Portland I	2,860
Fíler Silícico	3,013
Argila Calcinada A	36,854
Argila Calcinada B	26,905

Os resultados obtidos neste ensaio indicam maior superfície específica de ACA em relação à ACB. Esta diferença de superfície acarretará em maior reatividade da argila calcinada A nas primeiras idades, quando comparada com o mesmo teor de substituição de

ACB. Segundo Hollanders et al. (2016), a maior superfície específica de uma argila calcinada pode ser relacionada com um maior grau de amorficidade, resultando em material mais reativo nas primeiras idades. Essa elevada superfície específica de ACA e ACB em relação ao FS e ao CPI pode ser atribuída à morfologia das argilas calcinadas, segundo Hollanders et al. (2016), que possuem sua estrutura interlamelar amorfa, fruto do processo de desidroxilação da caulinita.

#### 4.1.5 ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.5. Ressalta-se que a Perda ao Fogo só pôde ser avaliada no CPI.

Tabela 4.5 - Resultados de FRX

Quantidade Detectada				
Composto	CPI	FS	ACA	ACB
SiO <sub>2</sub>	19,307%	92,717%	58,208%	51,536%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,418%	3,650%	31,725%	33,818%
MgO	5,323%	0,000%	0,000%	0,286%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,463%	1,366%	4,606%	7,686%
CaO	60,675%	0,398%	0,320%	0,000%
Na <sub>2</sub> O	0,230%	0,000%	0,000%	0,000%
K <sub>2</sub> O	0,537%	1,387%	0,770%	2,899%
TiO <sub>2</sub>	0,287%	0,025%	3,842%	3,372%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%
MnO	0,053%	0,000%	0,000%	0,000%
SO <sub>3</sub>	3,068%	0,365%	0,175%	0,085%
Outros	0,139%	0,092%	0,354%	0,318%
Perda ao Fogo	2,500%	-	-	-
Total	100,000%	100,000%	100,000%	100,000%

As parcelas referentes às massas de Trióxido de Enxofre e Óxido de Magnésio apresentadas pelo CPI estão ambas abaixo dos limites de, respectivamente, 4,5% e 6,5% para cimento Portland I - 40, de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018). Além disso, a perda ao fogo apresentada pelo cimento analisado (2,5%) foi inferior ao limite máximo da NBR 16697 (ABNT, 2018) de 4,5%.

Os resultados obtidos para o FS condizem com os apresentados para fileres silícicos similares utilizados por De La Varga et al. (2018) e Alhozaimy et al. (2012). Devido ao fato de ser advindo da Areia Normal, o material apresenta teor elevado de SiO<sub>2</sub> e parcelas mais

baixas de demais óxidos. Destaca-se também que o  $\text{SiO}_2$  apresentado pelo FS deve se apresentar em forma cristalina, a fim de garantir que o material não reaja quimicamente. Ressalta-se que para se fazer uso de FS em misturas para fins profissionais, é preciso que se avalie a reatividade deste material, a fim de se evitar as reações álcali-agregado.

As argilas ACA e ACB apresentaram elevados teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , compostos diretamente ligados ao efeito pozolânico dos materiais. Os resultados apresentados para estes MCS são corroborados com os resultados de FRX apresentados para argilas calcinadas em Lins (2017), Cordeiro et al. (2010) e Rocchi e Oliveira (2017).

A ASTM C618 (ASTM, 1991) trata sobre os critérios mínimos para que um material seja considerado pozolânico. Segundo esta norma, uma argila calcinada será considerada pozolânica quando no mínimo 70% de sua composição equivaler a soma dos teores  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Além disso, o material também deverá apresentar teor de  $\text{SO}_3$  inferior a 4% e perda ao fogo de no máximo 10%. Os dois primeiros critérios são respeitados por ACA e ACB, enquanto o último não pode ser avaliado.

#### **4.1.6 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)**

Os resultados obtidos ao realizar o ensaio no CP I são apresentados na Figura 4.2. Entre as principais fases identificadas se encontram a alita (silicato de cálcio,  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ) e a belita ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ), constituintes principais da composição do cimento Portland.

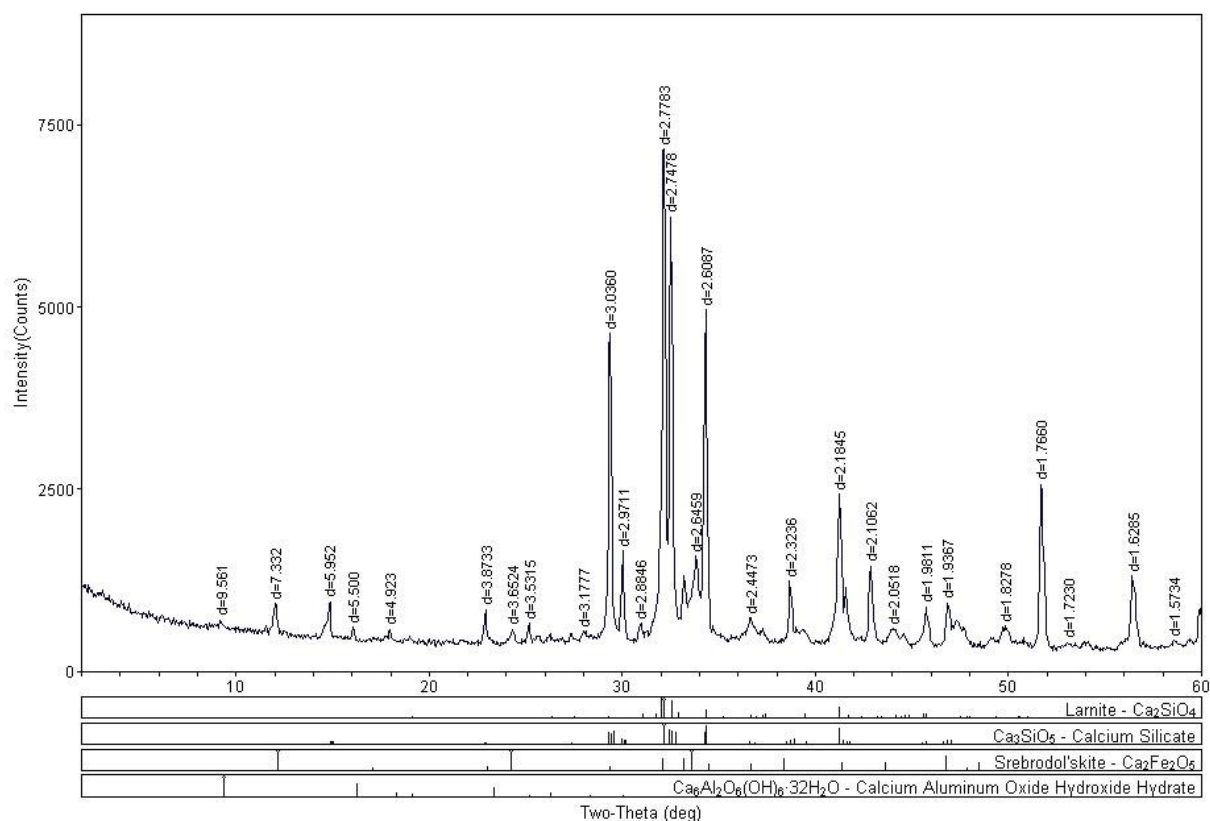


Figura 4.2 - Resultado de DRX do Cimento Portland I

Já a Figura 4.3 apresenta os dados obtidos com o ensaio de DRX do fíler silícico. Os resultados apontam claramente a elevada quantidade de quartzo na composição do material, o que era esperado tendo em vista que este MCS advém da moagem de uma areia lavada. Além disso, a elevada quantidade de  $\text{SiO}_2$  na forma de quartzo (forma cristalina e inerte) aponta para uma inatividade química do material. Dessa forma, fica evidente que o FS produzido apresentará apenas efeitos físicos quando incorporado a uma mistura cimentícia, tornando viável o seu uso para avaliar os efeitos pozolânicos e físicos da incorporação das argilas calcinadas utilizadas neste trabalho. Os resultados de DRX corroboram com os apresentados pelo ensaio de FRX para o FS.



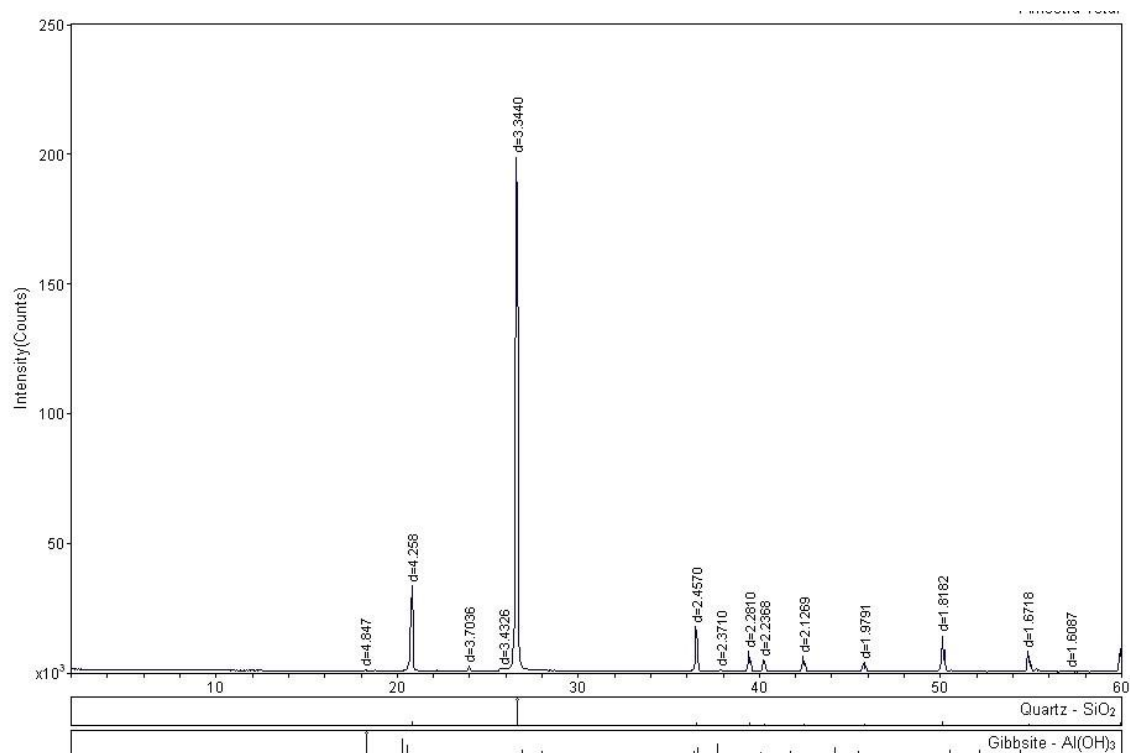


Figura 4.3 - Resultado de DRX do Fíler Silíceo

Os resultados obtidos com a ACA indicaram grandes picos de moléculas de SiO<sub>2</sub> e de Ilita (tipo menos reativo de argila, conforme Sabir et al. (2001)), além da presença mais discreta de Caulinita. A presença da caulinita e da ilita indica que o material não foi completamente desidroxilado, o que significa que este não atingirá todo o seu potencial pozolânico. Além disso, a presença de ilita em maior quantidade indica que a argila A pode vir a apresentar maior quantidade de ilita do que de caulinita em seu estado natural. O que acarreta em menor desempenho pozolânico do que um material majoritariamente caulínítico. A Figura 4.4 apresenta os resultados para ACA.

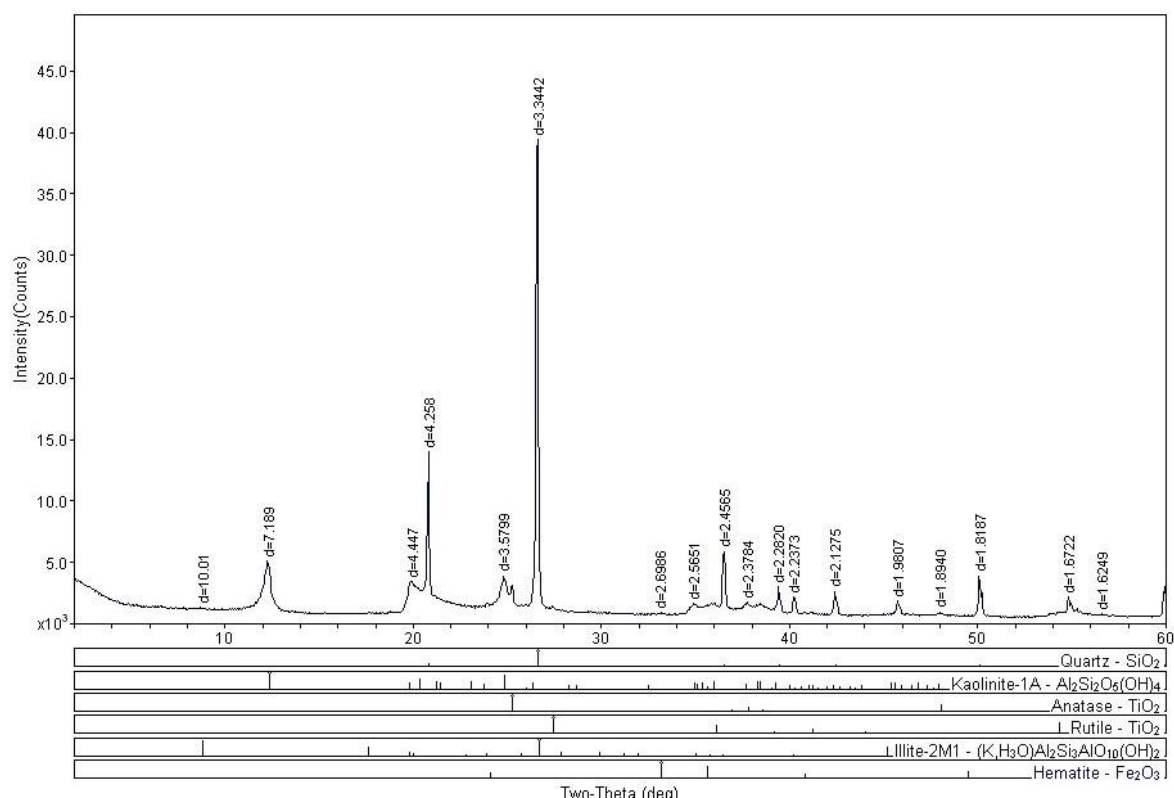


Figura 4.4 - Resultado de DRX da Argila Calcinada A

O potencial reativo de materiais pozolânicos em difratogramas é representado por um halo amorfo, conforme apresentado na Figura 4.5. Por meio desta figura, fica nítida a presença de material reativo que será responsável pela pozolanicidade do MCS. Hoppe Filho et al. (2017) realizou difratogramas em diversos materiais cimentícios, identificando halo amorfo em amostras de argila calcinada, mais especificamente em metacaulim.

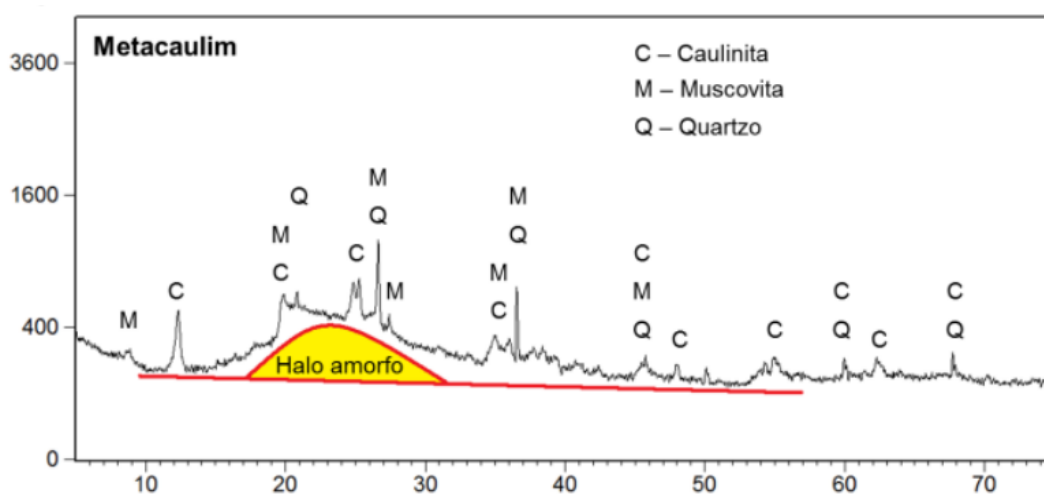


Figura 4.5 - Difratograma de Metacaulim com identificação de Halo amorfo relativo à metacaulinita (HOPPE FILHO et al., 2017)

Já os resultados obtidos com a ACB (Figura 4.6) indicaram um material com potencial reativo maior do que o de ACA. Isso se deve ao fato da presença nítida de um halo amorfo do material relativo à metacaulinita em ACB. Além disso, assim como ocorreu com ACA, há traços de caulinita não desidroxilada, indicando que ACB não atingiu todo seu potencial reativo com o tratamento térmico realizado. Nota-se também que ao contrário de ACA, não foi apresentado pico relativo a Ilita, o que pode apontar para uma argila natural mais caulínica do que a argila natural A, que por sua vez resulta em uma argila calcinada (ACB) mais pozolânica do que ACA.

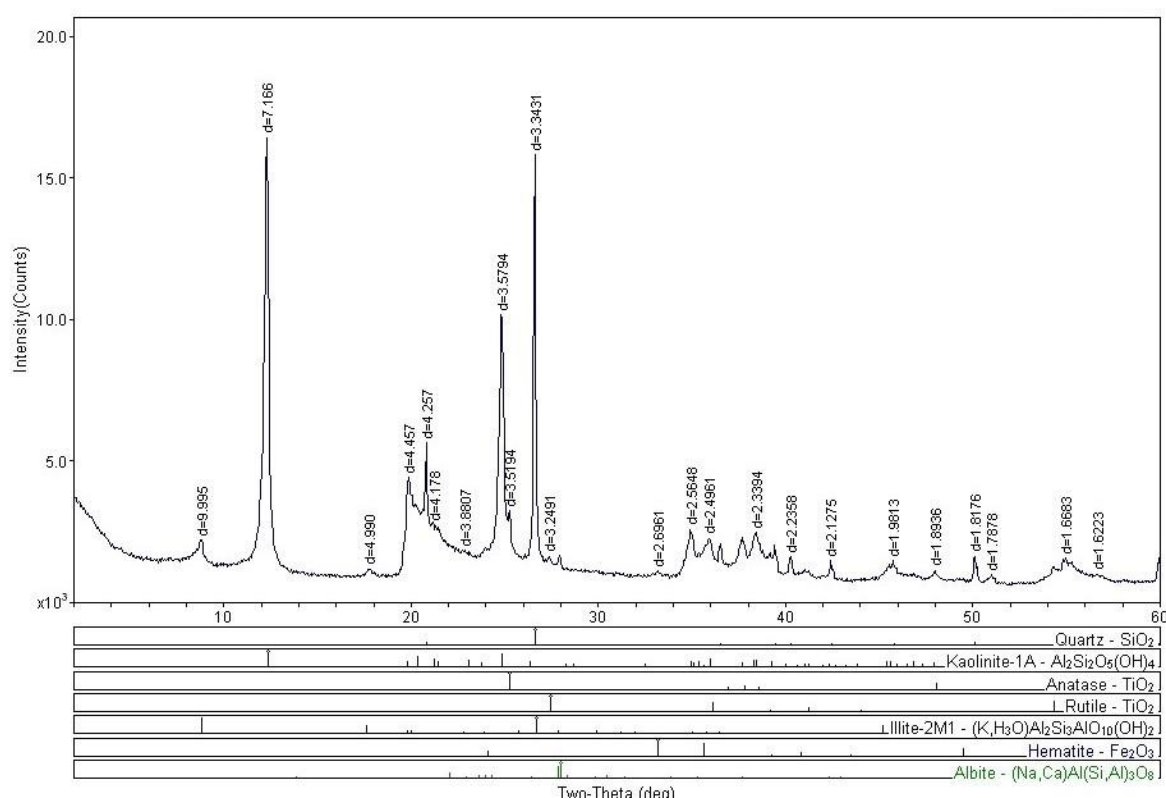


Figura 4.6 - Resultado de DRX da Argila Calcinada B

O ensaio de DRX, como mencionado anteriormente identifica fases cristalinas dos materiais analisados. Assim, ao compararmos os valores dos picos cristalinos de FS com o das argilas calcinadas, nota-se que o primeiro apresenta valores muito superiores. Isso indica que ACA e ACB apresentam maior parte de seu material em estado amorfo, enquanto o fíler silícico se apresenta em estado mais cristalino e, portanto, inerte.

Os resultados de DRX para as argilas calcinadas são condizentes com os de FRX apresentados para estas mesmas amostras. Tanto ACA quanto ACB apresentam grande quantidade de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e traços de óxidos de ferro e titânio.

#### 4.1.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A Figura 4.7 apresenta os resultados de MEV para o CPI utilizado na pesquisa. As microscopias corroboram com os resultados apresentados pela Granulometria à Laser, apresentando um material com elevada finura e grande parte das partículas com diâmetro entre 10 e 100 micrometros.

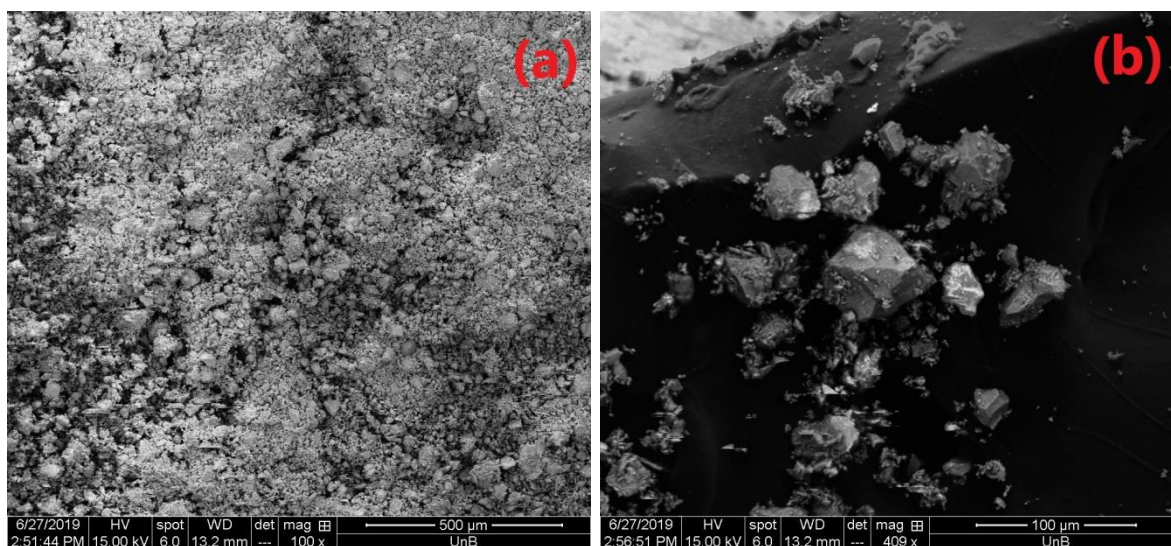


Figura 4.7 – Resultado de MEV do cimento Portland I (a) com ampliação de 100 vezes e (b) com ampliação de 409 vezes.

Na Figura 4.8 são apresentadas as microscopias do fíler silícico. É possível notar que o material apresenta estrutura angular e fraturada, fruto do seu processo de produção (moagem de areia), é possível notar que embora existam grãos com diâmetro próximo aos 100 micrômetros, há ainda grande quantidade de material com granulometria consideravelmente inferior a estes, em concordância com o apresentado pelo ensaio de Granulometria à Laser do fíler silícico.

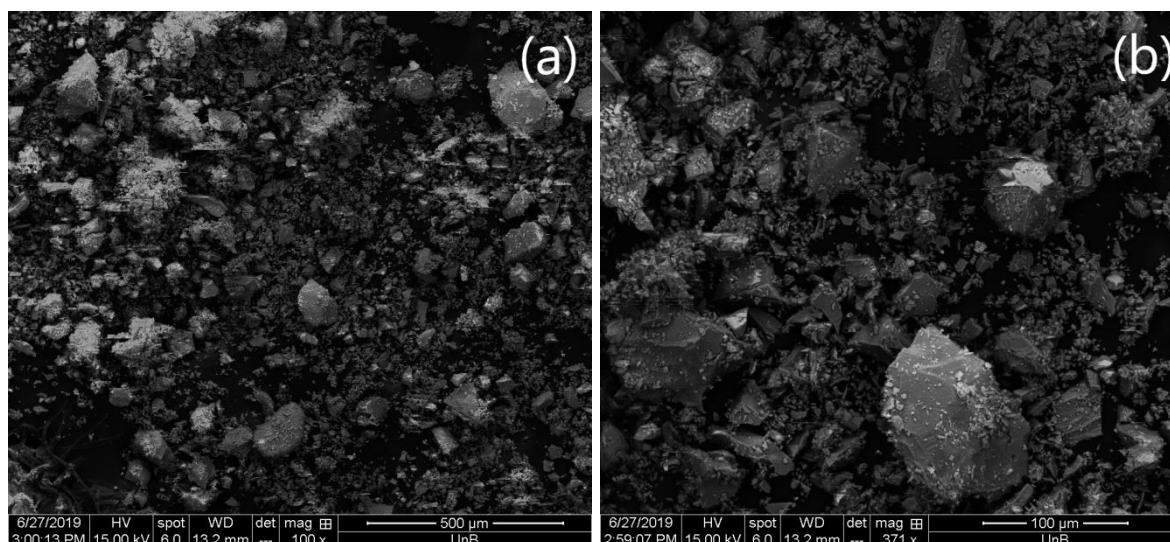


Figura 4.8 - Resultado de MEV do Fíler Silícico (a) com ampliação de 100 vezes e (b) com ampliação de 371 vezes.

As microscopias da ACA podem ser observadas na Figura 4.9. Os resultados obtidos neste ensaio apresentam partículas com elevada finura, podendo ser relacionada ao processo de moagem realizado neste MCS. É possível notar que foram formados alguns aglomerados de partículas, entretanto a maior parte do material não passou por esse efeito, como pode ser constatado na microscopia.

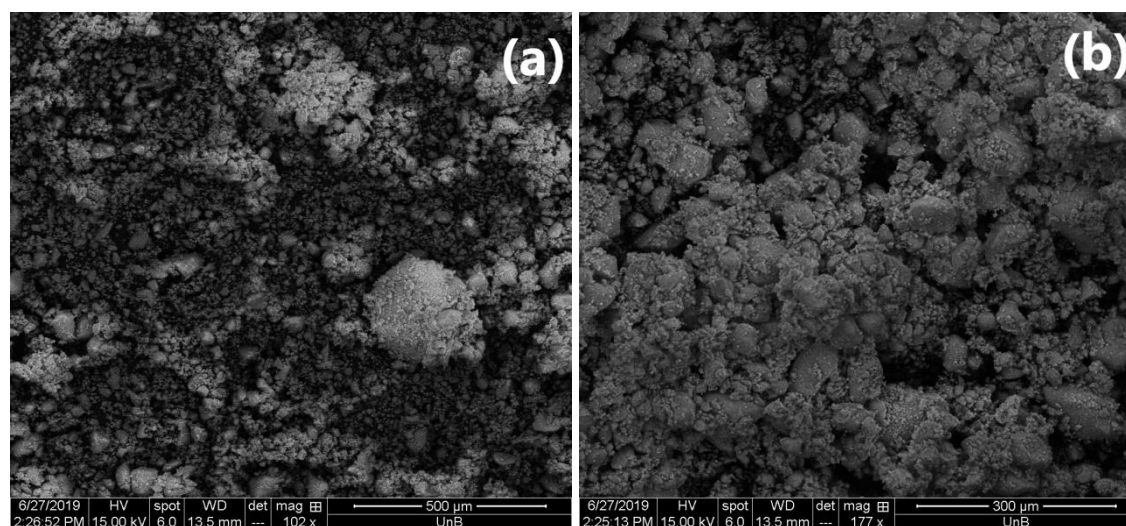


Figura 4.9 - Resultado de MEV da Argila Calcinada A (a) com ampliação de 102 vezes e (b) com ampliação de 177 vezes

A Figura 4.10 apresenta os resultados da microscopia na Argila Calcinada B. Ao se analisar as imagens obtidas no ensaio, fica evidente que o material apresenta morfologia esférica juntamente com partículas amorfas, como esperado para uma argila calcinada. Além disso, fica claro que há uma grande variedade de diâmetro dos grãos de argila calcinada B,

como comprovado pela Figura 4.10c e Figura 4.10d, em consonância com os resultados de granulometria à laser deste mesmo material. Ademais, ao compararmos os resultados de ACA com ACB é possível averiguar que elas possuem morfologias distintas, fruto de suas estruturas moleculares diferentes.

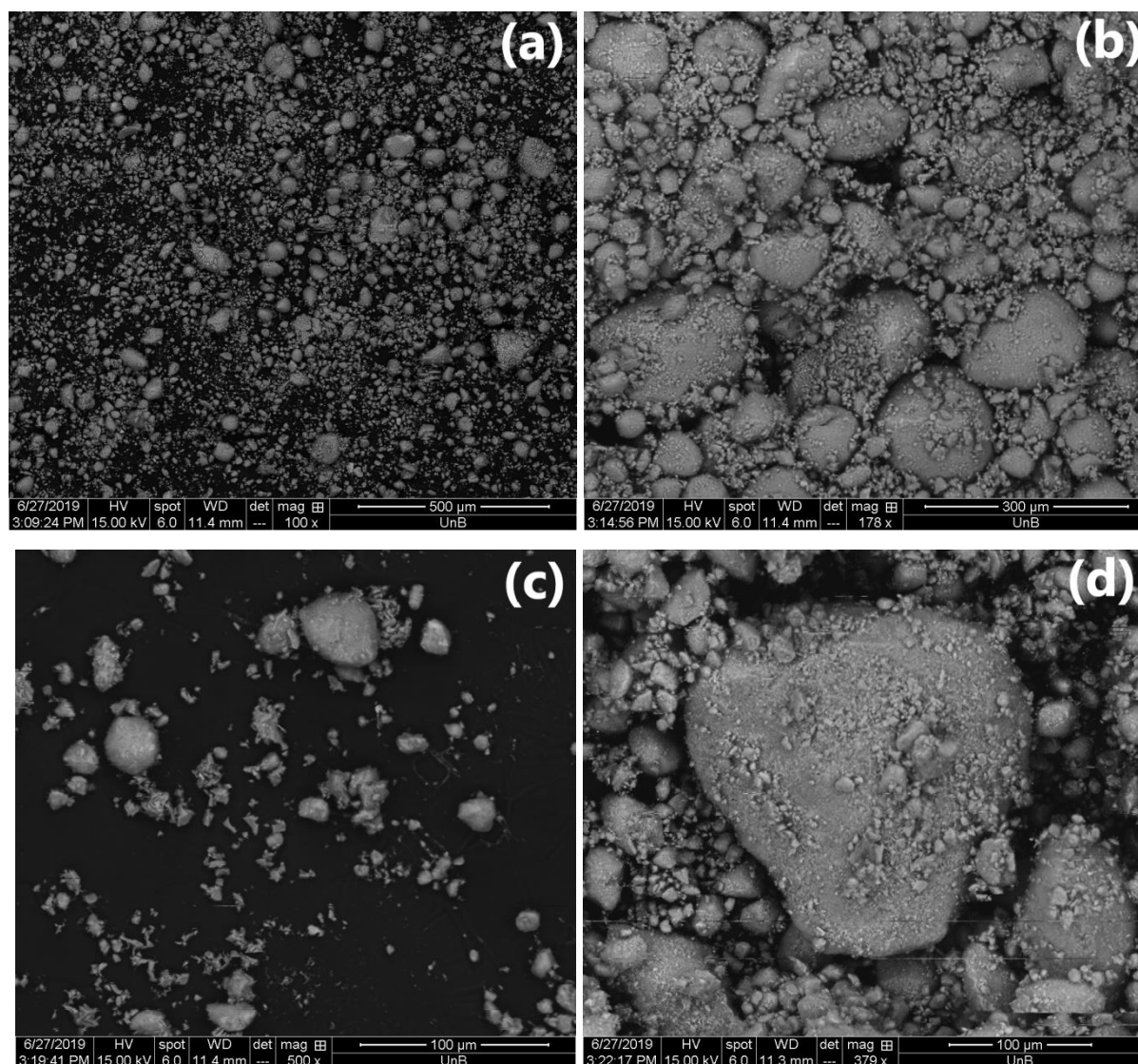


Figura 4.10 - Resultado de MEV da Argila Calcinada B com ampliação de (a) 100 vezes, (b) 175 vezes, (c) 500 vezes e (d) 379 vezes

Visualmente, é possível notar que a ACA apresenta mais finos do que ACB, o que corrobora com o ensaio de BET, justificando sua maior superfície específica. Além de garantir um aumento da reatividade dos materiais nas primeiras idades, este fato também corrobora com o efeito filer de ACA.

## 4.2 TEORES DE ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE (SP) ADOTADOS

A Tabela 4.6 apresenta os teores em porcentagem de SP utilizado em cada traço para que se mantivesse o espalhamento fixado. O intervalo fixado de espalhamento foi de  $197 \pm 10$  mm de abertura após 30 golpes em 30 segundos na Mesa de Consistência. Nota-se a partir dos dados apresentados que todos os teores utilizados estão dentro do intervalo recomendado pelo fabricante de até 1,8% em massa em relação ao aglomerante.

A partir destes resultados é possível notar que a incorporação de FS não demandou uso de aditivo, indicando que este MCS apresentou efeitos similares no estado fresco das misturas cimentícias. Isso é corroborado pela caracterização do FS e do CPI, onde se constatou que o FS produzido apresentou superfície específica e curva granulometria muito similares às do CPI.

Tabela 4.6 - Demanda de Aditivo Superplastificante das misturas estudadas

Traço	SP
REF	-
F15	-
F25	-
F35	-
A15	0,55%
A25	0,40%
A35	0,65%
B15	0,55%
B25	1,00%
B35	1,05%

Dessa forma, pode-se afirmar que devido à grande similaridade entre as características físicas do cimento e do fíler utilizados, estes apresentaram comportamento físico similar ao serem incorporados no estado fresco das argamassas estudadas. O que aponta para uma possível equivalência em seus comportamentos físicos também no estado endurecido das misturas.

A incorporação das argilas calcinadas nas misturas acarretou na necessidade do uso de SP. A elevada superfície específica de ACA e ACB resultou em uma maior demanda de água suprida pelo uso do aditivo superplastificante. Resultado que concorda com os resultados de superfície específica BET já mencionados. Ressalta-se também que ACB demandou maior quantidade de aditivo para se manter dentro do intervalo fixado.



### 4.3 RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados de resistência à compressão obtidos neste estudo com as argamassas de 1, 3, 7 e 28 dias de idade são apresentados Tabela 4.7. Estes foram utilizados no cálculo do índice de desempenho das diferentes misturas utilizadas.

Tabela 4.7 - Resultados de Resistência à Compressão

Traço	Resistência à Compressão [MPa]			
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
REF	17,50	21,50	32,50	35,53
F15	11,00	18,04	25,30	27,72
F25	10,20	16,50	21,40	26,65
F35	6,00	14,30	18,30	21,88
A15	15,18	28,20	33,28	47,27
A25	13,98	20,12	29,40	39,96
A35	7,78	15,70	24,45	38,58
B15	12,76	27,42	40,95	49,09
B25	17,04	24,76	40,29	52,84
B35	9,70	23,84	40,13	46,43

É possível notar já a partir destes dados que a ACB apresenta um comportamento melhor que ACA ao ser utilizada como MCS. Tal fato será mais bem detalhado e explanado durante as análises de índice de desempenho. Além disso, fica nítido como os traços contendo FS apresentaram resultados inferiores aos demais, isso devido ao já referido comportamento do fíler silícico, que não reage quimicamente com os produtos de hidratação do cimento Portland, agindo unicamente por meio dos efeitos de nucleação, fíler e diluição.

Os resultados individuais de cada corpo de prova rompido para todos os traços e idades se encontram no Apêndice B ao fim deste trabalho.

Ressalta-se também que o traço REF não atingiu o seu valor de mínimo de resistência à compressão aos 28 dias, como já mencionado durante a explanação da Etapa 02 – Caracterização dos Materiais do Programa Experimental.

### 4.4 ANÁLISE DO ÍNDICE DE DESEMPENHO DAS MISTURAS POR TIPO DE MCS UTILIZADO

A fim de interpretar melhor os resultados obtidos na resistência à compressão, serão analisados os Índices de Desempenho de cada mistura analisada. Por meio destes, serão realizadas análises mais profundas do comportamento tanto do fíler quanto das argilas



calcinadas. Como previamente mencionado, o índice de desempenho de cada tipo de argamassa foi calculado por meio da Equação 3.1, utilizando uma adaptação das normas NBR 5752 (ABNT 2014), NBR 15894-2 (ABNT, 2010) e NBR 13956-3 (ABNT, 2012). A Tabela 4.8 apresenta os valores dos índices de desempenho de todos os traços estudados em relação ao traço REF.

Tabela 4.8 - Índices de Desempenho à Compressão das Misturas

Traço	Índice de Desempenho			
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
REF	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
F15	62,9%	83,9%	77,8%	78,0%
F25	58,3%	76,7%	65,8%	75,0%
F35	34,3%	66,5%	56,3%	61,6%
A15	86,7%	131,1%	102,4%	133,0%
A25	79,9%	93,6%	90,5%	112,5%
A35	44,5%	73,0%	75,2%	108,6%
B15	72,9%	127,5%	126,0%	138,2%
B25	97,4%	115,2%	124,0%	148,7%
B35	55,4%	110,9%	123,5%	130,7%

Esta seção tratará do comportamento de cada MCS utilizado separadamente, avaliando o efeito da variação do teor de cada um destes no desempenho das misturas nas idades de 1 a 28 dias. Dessa forma serão analisados inicialmente os traços contendo fíler silícico e seu comportamento em relação ao traço REF, e em seguida o mesmo será feito para os traços contendo ACA e por fim para as misturas contendo ACB.

#### 4.4.1 MISTURAS CONTENDO FÍLER SILÍCICO

A Figura 4.11 apresenta os índices de desempenho dos traços F15, F25 e F35 em relação ao traço REF. Fica claro que a redução de clínquer na mistura em função do aumento da quantidade de fíler silícico resulta na queda do desempenho das argamassas. Quanto maior o teor de substituição de CP I pelo fíler inerte, maior a queda do índice de desempenho do traço.

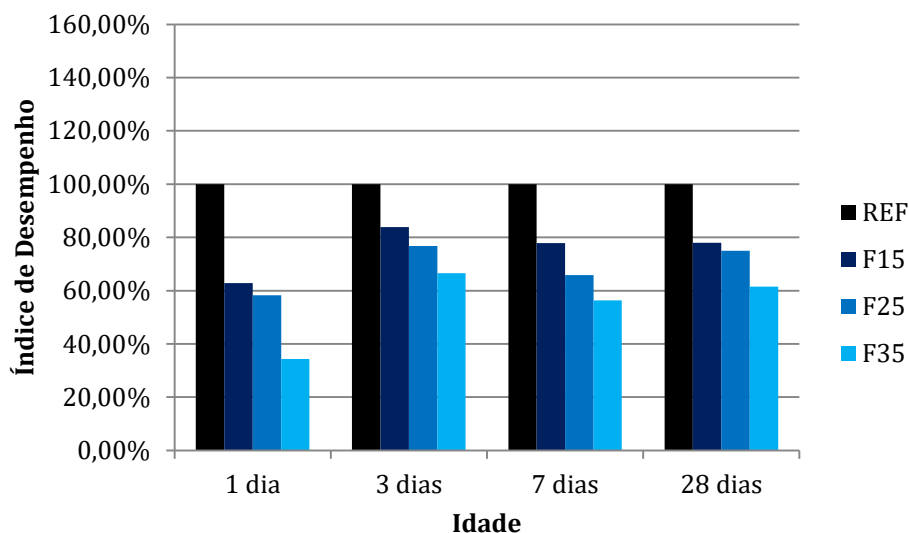


Figura 4.11- Índices de Desempenho dos traços contendo Fíler Silícico

O menor desempenho do fíler silícico em relação ao traço de referência era esperado, pois tais resultados já haviam sido apresentados em estudos como os de Flores et al. (2017) e Alhozaimy et al. (2012). A ausência de reatividade química com os produtos de hidratação do cimento, mencionada por De La Varga et al. (2018), leva à uma consequente queda da concentração de C-S-H na mistura, reduzindo a resistência mecânica da argamassa e por consequência seu índice de desempenho.

O traço F15 apresentou o melhor desempenho entre os traços contendo fíler silícico. Tal fato se deve ao maior consumo de cimento do traço, resultando em maior produção de C-S-H e consequentemente maior resistência à compressão. É seguro dizer que, segundo os resultados apresentados, um aumento no teor do fíler silícico leva a uma diminuição da resistência à compressão da mistura. E este comportamento ocorre fundamentalmente devido ao fato de que este MCS possui apenas efeitos físicos no sistema cimentício, o que significa que o comportamento apresentado pelos traços na Figura 4.11 pode ser atribuído apenas ao efeito físico de MCS.

#### 4.4.2 MISTURAS CONTENDO ARGILA CALCINADA A

A evolução dos índices de desempenho dos traços contendo ACA (A15, A25 e A35) é apresentada na Figura 4.12.

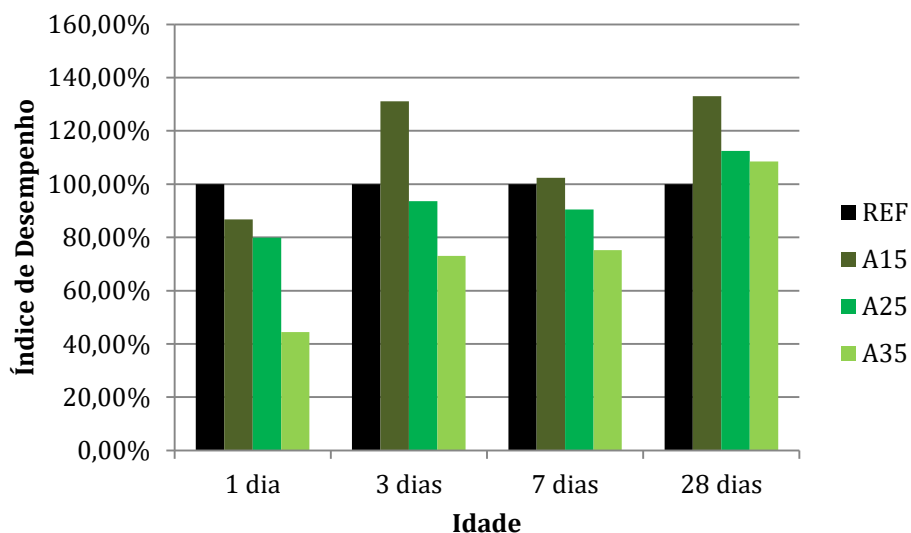


Figura 4.12 - Índices de Desempenho dos traços contendo Argila Calcinada A

O traço A15 se destaca como o com melhores índices de desempenho em todas as idades analisadas. Aos 3 e 7 dias esta mistura apresenta índices de respectivamente 131,1% e 102,4% o que pode ser justificado devido ao seu maior consumo de CPI que, de acordo com o apresentado na caracterização dos materiais, possui considerável desenvolvimento de resistência à compressão até os 7 dias de idade. Tal fator somado ao uso de um material pozolânico em um teor mais reduzido resultou em desempenhos superiores ao traço REF.

A partir dos resultados apresentados na Figura 4.12 é possível verificar que apenas a mistura A15 apresenta desempenho superior ao do traço de referência desde os 3 dias de idade, enquanto as os traços A25 e A35 só superam REF aos 28 dias. Tal fato pode ser atribuído à menor concentração de clínquer nestes dois últimos traços e pode vir a indicar uma possível reatividade pozolânica atenuada nas primeiras idades para ACA.

A elevação do teor de substituição para 25% (A25) resultou em comportamento mecânico inferior ao de A15, atingindo índice de desempenho aos 28 dias de 112,5%. Em termos de resistência à compressão, esta mistura atingiu 39,96 MPa, valor que praticamente corrigiu traço REF que, por ser composto de CPI-40, deveria ter atingido 40 MPa de resistência à compressão aos 28 dias (segundo a NBR 7215 (ABNT, 1997)). Dessa forma, é seguro afirmar que em o uso de 25% de substituição de CPI por ACA resulta em um cimento que atingirá a resistência devida pelo traço referência com menor consumo energético e liberação de CO<sub>2</sub> advindo da produção do clínquer.

Já os resultados apresentados pelo traço A35 foram consideravelmente próximos aos de A25 aos 28 dias, embora consideravelmente inferiores em relação aos traços A15 e A25 até os 7 dias. O desempenho apresentado por A35 aos 28 dias foi de 108,6%, ou seja, 38,58 MPa, valor próximo porém inferior ao obtido por A25 na mesma idade. Contudo, devido ao fato de que a mistura A35 contém 10% a menos de CPI e resultou em um desempenho apenas 3,9% abaixo do apresentado por A25, os resultados obtidos foram considerados promissores, uma vez que esta mistura pode ser utilizada para a produção de cimentos de categoria 32 MPa.

Os resultados apresentados pelos três traços contendo ACA corroboram com o comportamento apresentado por argilas calcinadas em Lins (2017) e Tironi et al. (2014). Fica claro que a argila calcinada A é um MCS de efeito pozolânico mais proeminente entre os 7 e 28 dias de idade e que embora este material não apresente índices de desempenho elevados como os apresentados por argilas calcinadas nos trabalhos de Tironi et al. (2012), a argila calcinada A pode contribuir para diminuição do consumo de energia, liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera e, por consequência, custo de produção de cimentos Portland.

#### **4.4.3 MISTURAS CONTENDO ARGILA CALCINADA B**

Os resultados obtidos de índice de desempenho para os traços contendo a ACB são apresentados na Figura 4.13. Ao contrário do apresentado pela ACA, fica evidente que a argila calcinada B apresenta desempenho mecânico superior ao traço REF em todos os seus teores já a partir dos 3 dias de idade, apontando para uma possível maior reatividade do material.

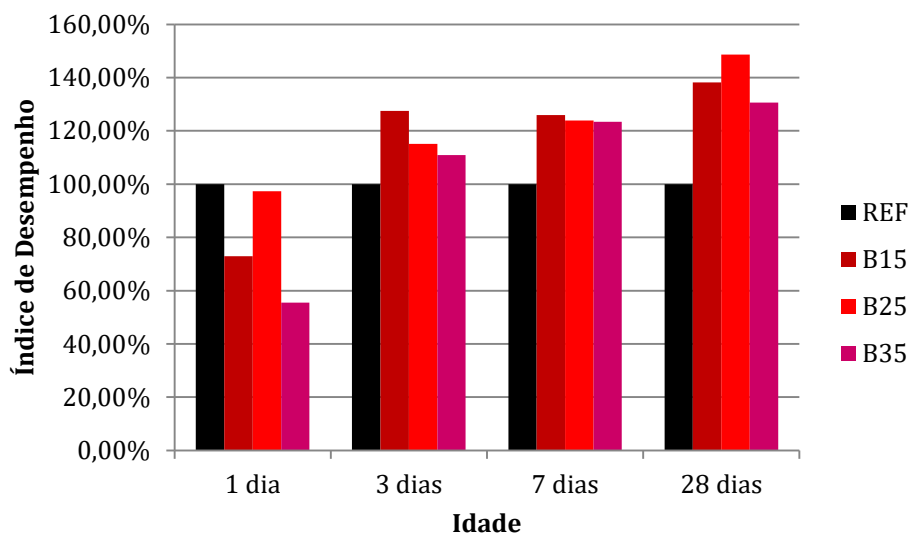


Figura 4.13 - Índices de Desempenho dos traços contendo Argila Calcinada B

Pode-se notar que todos os traços apresentaram considerável evolução dos seus desempenhos entre o primeiro e o sétimo dia, o que vai de acordo com a tendência apresentada por argilas calcinadas nos estudos de Antoni et. al (2012). Comportamento que pode ser relacionado com a elevada superfície específica de ACB, embora esta apresente superfície específica inferior a de ACA. Esse fato indica proeminente reatividade pozolânica de ACB, embora esta só possa ser efetivamente mensurada por meio de outros ensaios, como o de reatividade pozolânica - Chapelle.

O traço B15 é o que apresenta maior consumo de clínquer entre os traços em questão. Devido a isso este apresenta o maior desenvolvimento de resistência, e por consequência de índice de desempenho, até os 7 dias de idade (característica do CPI utilizado). Porém, ao analisar os resultados com 28 dias de idade é possível averiguar que B15 já não apresenta o maior desempenho entre os traços contendo ACB. Este fato pode ser atribuído ao baixo desenvolvimento de resistência do CPI entre os 7 e 28 dias, aliado ao baixo teor da argila calcinada B na mistura. Ainda assim o índice de desempenho de B15 é satisfatório, ultrapassando em 38% o desempenho do traço REF e chegando a 49,09 MPa de resistência à compressão.

Os resultados obtidos com a ACB indicam que, entre os teores estudados, a substituição de 25% de cimento Portland por este MCS resulta em melhor desempenho mecânico aos 28 dias, resultando em um índice de desempenho de 148,7% em relação ao traço REF. Este comportamento é responsável por elevar a resistência da mistura de 35,53

MPa (resistência obtida aos 28 dias pelo traço referência) para 52,84 MPa aos 28 dias de idade, valor este que além de superar o valor de resistência característica que o cimento deveria ter obtido (40 MPa), o eleva para uma categoria superior a 50 MPa, viabilizando o uso desta mistura em concretos de alto desempenho.

A mistura B35 apresentou os menores índices de desempenho em todas as idades estudadas entre os traços contendo ACB. Esse comportamento pode ser atribuído ao menor consumo de cimento e à incapacidade argila calcinada presente nesta mistura de compensar a menor concentração de clínquer na argamassa. Entretanto, é válido ressaltar que embora B35 tenha apresentado resultados muito inferiores com 1 e 3 dias de idade em relação aos demais traços em questão, as diferenças entre os valores de resistência à compressão se tornaram muito menores entre os traços aos 7 e 28 dias, indicando maior correlação entre os resultados apresentados nestas idades. No “Capítulo 4.7 - Análise estatística dos dados” será abordado mais profundamente tal comportamento.

Ao se analisar os resultados de um ponto de vista ambiental, pode-se afirmar que o traço B35 é o mais atrativo. Isto porque esta mistura emprega uma maior porcentagem de substituição, resultando em menor consumo de clínquer, e ainda sim obtém desempenho 30% acima do traço REF, atingindo 46,43 MPa aos 28 dias de idade. A mistura B35 obteve desempenho satisfatório, atingindo e ultrapassando o valor característico de resistência do cimento Portland utilizado (40 MPa), proporcionando melhor desempenho mecânico com menor impacto ambiental (devido ao menor consumo de clínquer). Assim, é possível afirmar que embora o traço B35 tenha apresentado o menor desempenho entre os traços contendo a argila calcinada B, este menor desempenho ainda sim é promissor, em relação à mistura REF, e pode vir a justificar o uso deste traço para a produção de cimento Portland.

#### **4.5 ANÁLISE DO ÍNDICE DE DESEMPENHO DAS MISTURAS POR TEOR DE SUBSTITUIÇÃO**

Nesta seção serão analisados os efeitos dos diferentes MCS estudados de acordo com o teor de substituição utilizado, ou seja, será comparado o efeito do fíler e das argilas calcinadas de acordo com a porcentagem de substituição adotada. Dessa forma, será avaliado o comportamento dos MCS com os teores de 15%, 25% e 35% separadamente. É importante ressaltar que devido à metodologia utilizada, ao compararmos traços contendo o fíler silícico com os traços contendo ACA e ACB (com o mesmo teor de substituição) será possível desacoplar os efeitos físicos dos químicos de cada MCS.

Além disso, será dado destaque ao comportamento das argilas calcinadas ACA e ACB de acordo com a NBR 5752 (ABNT, 2014). Isto devido ao fato desta norma ser a adequada para a avaliação do índice de desempenho de materiais pozolânicos.

#### 4.5.1 MISTURAS CONTENDO TEOR DE 15%

A Figura 4.14 expõe a evolução dos índices de desempenho dos traços REF, F15, A15 e B15. Quando comparados os resultados de índice de desempenho destes traços, é notório que até os 7 dias de idade ACA apresenta valores superiores à ACB, entretanto a taxa de crescimento do traço A15 diminui entre após o dia 3, enquanto a partir desta idade a argila calcinada B tem uma elevação de seu ganho de resistência. Desse modo, B15 ultrapassa o desempenho de A15 a partir da idade de 7 dias. Estes comportamentos de ACA e ACB foram discutidos nas seções 3.3.4 - Superfície específica BET, 4.4.2 - Misturas contendo Argila Calcinada A e 4.4.3 - Misturas contendo Argila Calcinada B e são atribuídos à superfície específica mais elevada de ACA em relação a ACB (responsável por ganhos de resistência nas primeiras idades) e ao provável maior potencial pozolânico de ACB (relacionado ao desenvolvimento de resistência à compressão em idades mais tardias).

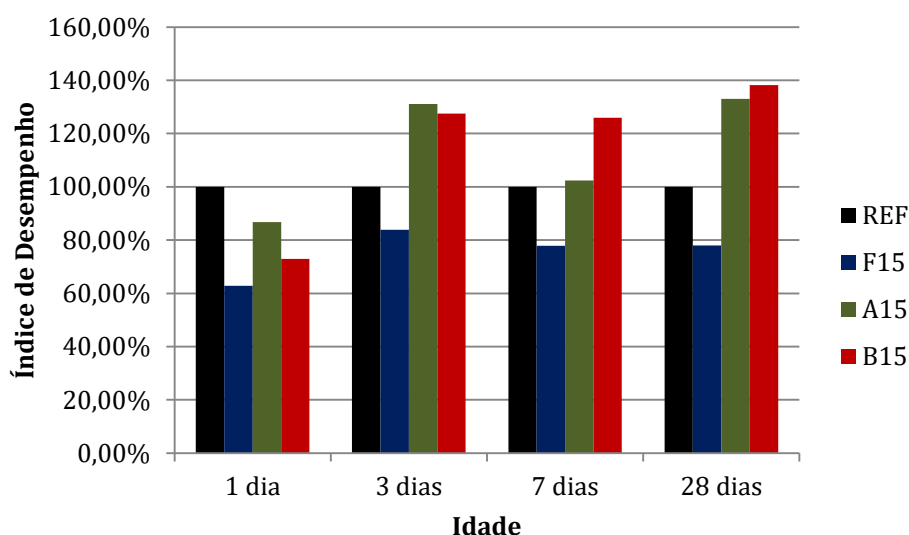


Figura 4.14 - Índice de Desempenho das misturas contendo 15% de substituição

É possível notar também que estas misturas apresentaram resultados muito próximos entre si quando comparados com os apresentados pelos outros teores de substituição. Esse fato pode ser relacionado ao elevado consumo de cimento das misturas em questão. Ou seja, o elevado teor de CPI colaborou para que o comportamento deste se sobressaísse sobre o dos MCS utilizados, o que acarretou na menor variação de desempenho apresentada.

#### 4.5.2 MISTURAS CONTENDO TEOR DE 25%

A Figura 4.15 apresenta a evolução do índice das misturas REF, F25, A25 e B25.

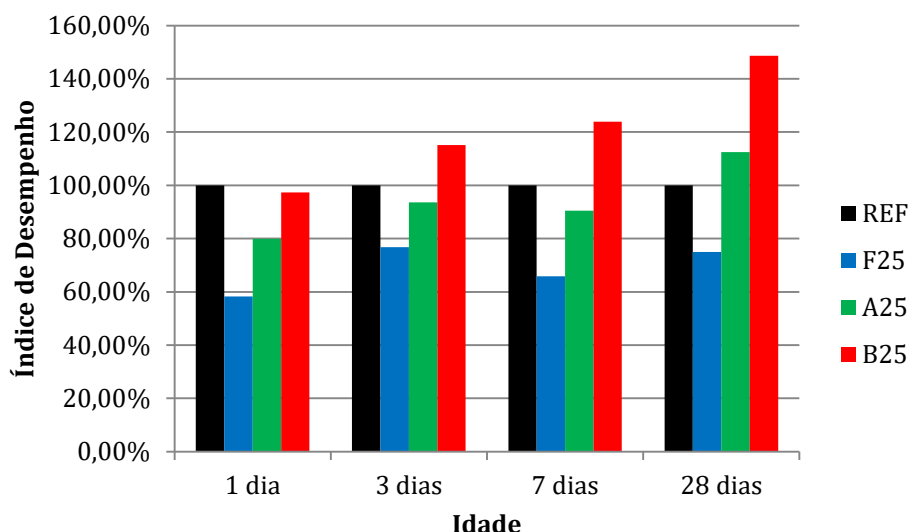


Figura 4.15 - Índice de Desempenho das misturas contendo 25% de substituição

Ao ser comparar os resultados apresentados para os traços F25, A25 e B25, é evidente que o último exibiu desempenho claramente superior aos demais. A mistura B25 apresentou índice de desempenho superior às demais misturas em todas as idades estudadas, chegando aos 28 dias com índice de 148,7% enquanto o A25 obteve 112,4% e F25 apenas 74,9% na mesma idade.

##### 4.5.2.1 ANÁLISE SEGUNDO A NBR 5752

A NBR 5752 (ABNT, 2014) é a norma referência para a determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos no Brasil. Devido a isso, será realizada uma análise dos resultados relevantes para esta norma, ou seja, os índices de desempenho dos traços contendo 25% de substituição de aglomerante por ACA e ACB com 28 dias de idade. Sendo assim, de acordo com a norma os únicos traços relevantes seriam A25, B25 e REF (para o cálculo do índice de desempenho). A única ressalva se dá pelo fato da norma em questão fazer menção ao uso do CP II F – 32, enquanto o aglomerante utilizado nesta pesquisa foi o CP I – 40. Os resultados são discriminados na Figura 4.16.



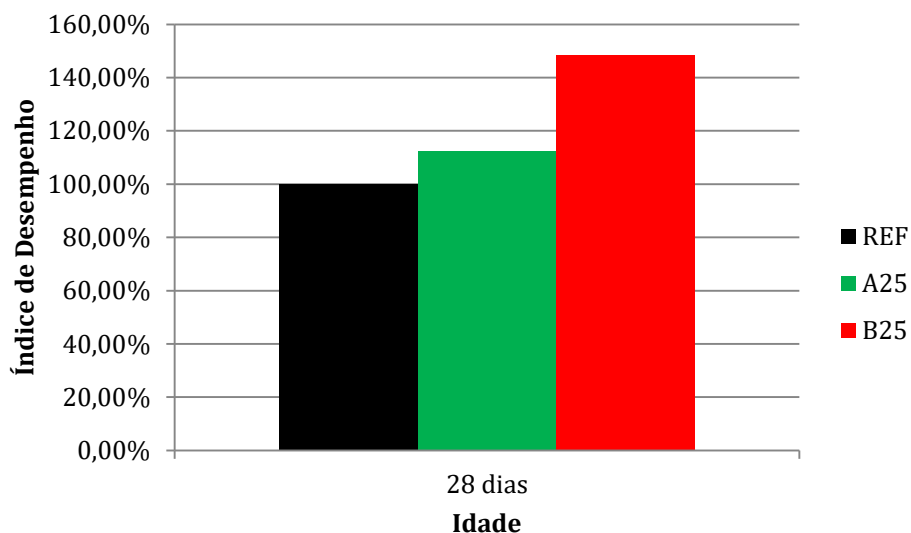


Figura 4.16 - Índice de Desempenho de ACA e ACB segundo a NBR 5752 (ABNT, 2014)

Segundo a norma, os valores de índice de desempenho para ACA e ACB são de 112,4% e 148,7%, respectivamente, classificando ambos como materiais pozolânicos. Ao se avaliar apenas o critério desta NBR que leva em conta apenas o efeito do MCS no comportamento mecânico do material, é seguro dizer que a argila ACB é a mais eficiente ao ser incorporada na mistura cimentícia.

#### 4.5.3 MISTURAS CONTENDO TEOR DE 35%

A seguir é apresentada a Figura 4.17 onde é explicitada a evolução do índice de desempenho das misturas A35, B35, F35 e REF.

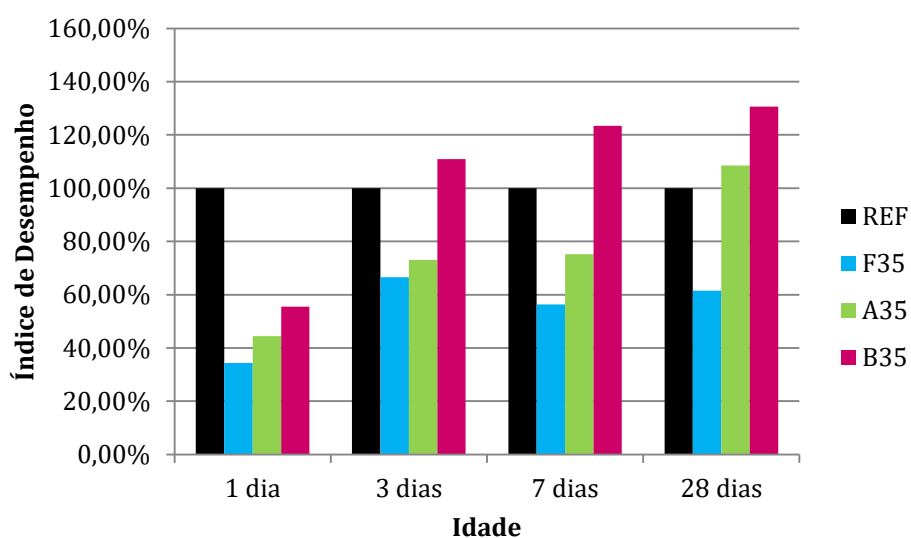


Figura 4.17 - Índice de Desempenho das misturas contendo 35% de substituição

Nota-se que todas as misturas apresentaram desempenho inferior a 60% com um dia de idade. Tal fato pode ser relacionado com o baixo consumo de cimento de cada um destes traços, fruto do teor mais elevado de substituição, apresentando e 35% de fíler silícico ou argila calcinada, materiais que não conferem grandes ganhos em idades mais jovens das misturas.

Contudo, a mistura B35 apresenta, já a partir dos 3 dias, desempenho superior ao traço REF, assim como ocorreu com as misturas contendo 25% de substituição. Ao fim dos 28 dias, esse traço apresenta o maior desempenho entre os traços com o teor de 35% ao atingir índice de desempenho de 138,68%. Entretanto, este teor elevado de substituição resultou em desempenho da mistura A35 abaixo de 100% até os 7 dias de idade, apenas aos 28 dias esse traço ultrapassou o índice de desempenho de REF ao se elevar para 108,57%.

#### 4.6 PROPOSTA DE AVALIAÇÃO DOS EFEITOS POZOLÂNICO E FÍSICO

Nesta seção serão avaliadas, segundo o método já explicitado anteriormente, a influência dos efeitos pozolânico e físico na resistência à compressão das misturas analisadas. Para isso, será feita a análise por teor de substituição de CPI por MCS.

##### 4.6.1 TEOR DE 15%

A influência dos efeitos físicos e pozolânicos na resistência mecânica das misturas é apresentada na Tabela 4.9. Os valores apresentados foram encontrados ao se utilizar as Equações 3.2 a 3.4 que tornaram possível desacoplar o efeito pozolânico e o efeito físico de cada uma das argilas calcinadas estudadas. Conforme já explicitado anteriormente, o efeito físico de ACA e ACB é considerado o mesmo para a metodologia adotada.

Tabela 4.9 - Influência dos Efeitos Físico e Pozolânico nos teores de 15% de FS, ACA e ACB

Traço	Desenvolvimento de Resistência			
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Relativo ao Efeito Físico [MPa]				
A15/B15/F15	-3,88	-0,23	-2,33	-2,48
Relativo ao Efeito Pozolânico [MPa]				
A15	4,18	10,16	7,98	19,55
B15	1,76	9,38	15,65	21,37

Ressalta-se que os traços contendo incorporação de FS (como F15) não contam com efeitos pozolânicos, tendo seus desempenhos mecânicos influenciados apenas pelo conteúdo de clínquer e efeitos físicos do fíler silícico.

Nota-se que o efeito físico foi relacionado com diminuição da resistência à compressão das misturas no teor de 15% de substituição. Este fato indica que a incorporação de 15% de MCS com o comportamento físico apresentado não foi capaz de compensar a queda na concentração de clínquer no sistema.

Ao se analisar o efeito pozolânico de ACA no traço A15 se constatou que este foi responsável por um ganho de resistência de aproximadamente 8 MPa aos 7 dias de idade, o que elevou o seu índice de desempenho da mistura de 77,9% para 102,4%. É possível notar que A15 apresentou ganhos de resistência superiores aos de B15 até os 7 dias de idade, resultado da superfície específica de ACA que é superior a de ACB. Tal comportamento corrobora com os resultados apresentados de Índice de Desempenho das misturas contendo ACA. Confirmando que o grande ganho de resistência nas primeiras idades advém do efeito pozolânico acelerado pela elevada superfície específica.

Já a mistura B15 apresentou ganho de resistência à compressão devido ao efeito pozolânico de ACB de aproximadamente 21,4 MPa aos 28 dias. Esse ganho resultou em uma elevação do índice de desempenho de 78,0% (F15 – efeitos físicos) para 138,2%, apontando para elevada reatividade pozolânica de ACB nas idades mais tardias, o que condiz com os resultados apresentados por Lins (2017). Nota-se também que esta parcela de ganho relativa ao efeito químico do MCS equivale a aproximadamente metade da resistência à compressão apresentada pelo traço B15 aos 28 dias de idade.

#### 4.6.2 TEOR DE 25%

A influência dos efeitos físicos e químicos do uso de teores de 25% de MCS nas misturas é apresentada na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Influência dos Efeitos Físico e Pozolânico nos teores de 25% de FS, ACA e ACB

Traço	Desenvolvimento de Resistência			
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Relativo ao Efeito Físico [MPa]				
A25/B25/F25	-2,93	0,38	-2,98	-0,002
Relativo ao Efeito Pozolânico [MPa]				
A25	3,78	3,62	8,00	13,31
B25	6,84	8,26	18,89	26,19

Analogamente ao que ocorreu no teor de 15% de substituição, os efeitos físicos de todos os traços são os mesmos para todas as misturas contendo 25% de incorporação de MCS. Entretanto, este maior teor foi capaz de praticamente compensar a perda de influência do clínquer ao fim dos 28 dias. Caso se analise o traço F25 (que apresenta apenas a influência do efeito físico) pode-se constatar que este apresenta índice de desempenho de praticamente 75% aos 28 dias, o que concorda com os resultados apresentados na Tabela 4.10.

Estes resultados indicam que o teor de 25% é o menos prejudicial para as misturas em termos de influência de efeitos físicos na resistência à compressão. Isso porque o teor de 35% resultou em resultados negativos aos 28 dias, como será demonstrado em outras seções deste trabalho.

O efeito pozolânico apresentado pela argila A foi responsável por ganhos de resistência de 3,78 MPa com 1 dia de idade a 13,31 MPa aos 28 dias. Esse comportamento foi o equivalente à elevação do índice de desempenho de 74,9% (efeito físico – traço F25) para 112,4% aos 28 dias devido ao efeito pozolânico (traço A25).

Já o efeito de ACB no índice de desempenho da mistura indica uma elevação de 74,9% em F25, para 148,7% em B25, indicando grande reatividade pozolânica da argila calcinada. Em termos de resistência à compressão, o efeito pozolânico de ACB resultou em um ganho extra de aproximadamente 26,2 MPa aos 28 dias, praticamente dobrando o valor de resistência do traço F25, que conta apenas com efeito físico, o que indica que o efeito pozolânico de ACB pode ser responsável por 50% do ganho de resistência apresentado quando se substitui 25% de aglomerante por esse MCS.

Ressalta-se que o efeito pozolânico apresentado por B25 aos 7 dias de idade foi responsável por um aumento de 18,9 MPa, ganho superior ao resultante de A25 com 28 dias de idade, de 13,3 MPa. Ao compararmos os efeitos pozolânicos na resistência à compressão das duas argilas calcinadas com 28 dias, se averigua que B25 apresenta quase o dobro de ganho de resistência devido ao efeito pozolânico, quando comparado com A25, respectivamente 26,19 MPa e 13,31 MPa. Estes resultados indicam a maior eficiência do uso de ACB em relação à ACA para teores de 25% de substituição.

#### 4.6.3 TEOR DE 35%

A Tabela 4.11 apresenta os valores de variação de resistência à compressão devidos aos efeitos físicos e pozolânicos dos MCS incorporados no teor de 35%.

Tabela 4.11 - Influência dos Efeitos Físico e Pozolânico nos teores de 35% de FS, ACA e ACB

Traço	Desenvolvimento de Resistência			
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Relativo ao Efeito Físico [MPa]				
A35/B35/F35	-5,38	0,33	-2,83	-1,22
Relativo ao Efeito Pozolânico [MPa]				
A35	1,78	1,40	6,15	16,70
B35	3,70	9,54	21,83	24,56

Assim como ocorreu nos teores de 25% e 15%, a incorporação de FS não foi capaz de compensar a queda no consumo de clínquer da mistura no primeiro dia de idade. Contudo, houve uma compensação positiva aos 3 dias e um desenvolvimento de resistência até os 28 dias que resultou em um valor pouco abaixo do esperado para o consumo de 65% de CPI da mistura.

Os resultados de ganho de resistência devido ao efeito pozolânico de ACB no traço B35 demonstram que essa argila calcinada, incorporada no teor de 35%, apresentou reatividade pozolânica considerável já entre os 3 e 7 dias. Embora a taxa de crescimento menor entre os 7 e 28 dias não tenha sido tão elevada quanto nestas primeiras idades, esta ainda foi consideravelmente reativa. Ressalta-se também que o ganho de resistência de B35 devido ao efeito químico de ACB aos 28 dias de idade resultou em uma elevação do índice de desempenho de 69,1%, ou seja, de 61,6% (apresentado pelo efeito fíler em F35) para 130,6% (apresentado por B35), corroborando com o comportamento exibido por ACB em outros

teores de substituição, onde o efeito pozolânico deste MCS é responsável por cerca de 50% do ganho de resistência da mistura quando da incorporação deste material.

Já para ACA, o ganho de resistência devido ao efeito pozolânico foi muito menos pronunciado nas primeiras idades ao se comparar com os demais teores estudados. Este comportamento divergente dos demais pode ser relacionado ao menor consumo de clínquer desta mistura, devido ao elevado teor de substituição adotado. Por consequência, Mwiti et al. (2018) cita que pode ocorrer ausência de material que garanta a ocorrência de reações pozolânicas, fazendo com que uma parte considerável do material se comporte como um fíler inerte ao não reagir.

Além disso, se destaca que o ganho de resistência relativo ao efeito químico de ACA aos 28 dias foi responsável por elevar o índice de desempenho do material de 61,6% para 108,57%, indicando que o efeito pozolânico de ACA se traduz em aproximadamente 47% do ganho de resistência da mistura cimentícia quando se incorpora este MCS.

Ao comparar os efeitos pozolânicos de A35 e B35, pode-se concluir que, assim como para o teor de 25%, a argila calcinada B é mais reativa. O ganho de resistência atribuído à pozolanidade de ACB aos 7 dias foi superior ao atribuído à ACA aos 28 dias de idade, corroborando com os resultados obtidos nos demais teores estudados. Dessa forma, sabendo que B35 apresentou melhores índices de desempenho em todas as idades com teor de 35%, maior influência do efeito pozolânico e maior reatividade em relação ao traço A35, se constatou que para este teor, a argila calcinada ACB é um MCS mais eficiente.

## **4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS**

A análise estatística dos dados foi utilizada para averiguar se as diferenças apresentadas nos valores de resistência à compressão para cada traço foi significativa ou não, e para categorizar as misturas de acordo com seus comportamentos. As análises foram realizadas com os resultados de cada corpo de prova rompido com idade de 28 dias, os dados utilizados se encontram no Apêndice B ao fim deste trabalho.

### **4.7.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA – ANOVA**

Esta análise indica a significância ou não das diferenças entre os resultados apresentados. Foi adotada como variável independente o tipo de mistura ao qual o corpo de prova pertence e como dependente a Resistência à Compressão dos corpos de prova. O nível

de significância adotado neste trabalho foi de 5%, dessa forma o nível de confiança para o teste é de 95%. A Tabela 4.12 apresenta os dados do teste realizado.

Tabela 4.12 - Resultado da Análise de Variância

Idade	SS	MS	F	P-VALOR
28 dias	4005,94	445,10	37,49	$6,6 \times 10^{-14}$

Nota-se que o P-valor encontrado foi inferior a 0,05, indicando que a variável independente tem influência sobre a variável dependente, e que por consequência as diferenças encontradas são significativas. Assim é possível confirmar que as diferenças de resistência à compressão (e de índice de desempenho, por consequência) são realmente relevantes e consideráveis ao se variar o traço analisado, dentro do intervalo de confiança adotado.

#### 4.7.2 TESTE DE DUNCAN

O Teste de Duncan foi realizado de forma a complementar a Análise de Variância. Os resultados obtidos nesse teste são apresentados na Tabela 4.13. É possível notar que os traços foram subdivididos em 5 grupos de acordo com o valor de suas resistências à compressão, indicando a variação dos resultados ao se variar o tipo de mistura. Os grupos foram classificados em ordem crescente de resistência do traço, ou seja, no grupo 1 estão alocadas as misturas com menores valores de resistência à compressão, enquanto no grupo 5 se encontram os traços com melhor desempenho mecânico.

Tabela 4.13 - Resultados do Teste de Duncan

Traço	GRUPO				
	1	2	3	4	5
F35	X				
F25	X	X			
F15		X			
REF			X		
A35			X		
A25			X		
B35				X	
A15				X	
B15				X	X
B25					X

Os Traços contendo Fíler silícico foram todos alocados nos grupos 1 e 2, indicando que, como esperado, estes apresentam os piores desempenhos mecânicos entre as misturas estudadas. Assim como mencionado durante a análise do índice de desempenho das misturas contendo fíler, quanto maior a substituição de fíler na mistura pior o seu desempenho mecânico, conforme diz Flores et al. (2017), o que é corroborado pelo Teste de Duncan que classifica o traço F35 como o com pior desempenho mecânico, seguido de F25 (que apresenta tendência de aumento de resistência em relação a este) e F15.

O traço REF foi classificado no grupo 3 juntamente com as misturas A35 e A25, que apresentaram valores de resistência no máximo 12% acima do apresentado por REF (ou seja, com resistência próxima a 40,00 MPa). Dessa forma, pode-se dizer que neste grupo estão as misturas que podem ser utilizadas para corrigir o cimento Portland utilizado, elevando sua resistência para valores próximos ao seu valor nominal. É importante ressaltar que embora as diferenças entre os resultados dos traços A35 e A25 tenham sido significativas (conforme demonstrado pela análise de variância), estes apresentaram comportamento similar e devido a isso obtiveram a mesma classificação pelo Teste de Duncan.

Encontram-se no grupo 4 os traços A15, B15 e B35, todos com índice de desempenho aos 28 dias superior a 130% em relação a REF. Entre esses traços, as misturas A15 e B35 são as que pertencem unicamente ao grupo 4, estas são respectivamente a com melhor desempenho de ACA e o pior de ACB. Desta forma, fica evidente que o resultado mais desfavorável de ACB é estatisticamente similar ao melhor resultado mecânico de ACA, ainda que as diferenças entre os resultados sejam significativas. Esse fato corrobora com os demais resultados de resistência à compressão, indicando que o uso de ACB é mais eficiente como MCS pozolânico do que ACA.

Além disso, nota-se que os traços B15 e B35 apresentam comportamento similar, com B15 com tendência de aumento em relação ao segundo traço. Este fato condiz com as análises realizadas em relação aos índices de desempenho destes dois traços, e confirma que as diferenças entre estes, apesar de significativas não foram suficientes para classificar as médias de suas resistências como estatisticamente diferentes.

O grupo 5 abriga os traços B15 e B25, classificados respectivamente como o segundo e melhor desempenho mecânico entre os estudados neste trabalho. O traço B15 se aproxima do desempenho de B25, porém apresenta tendência de diminuição em relação a este, por



pertencer também ao grupo 4, e devido a isso é considerado inferior no quesito de desempenho mecânico.

Pode-se notar que os resultados se comportaram de tal forma que ficou nítido quais MCS são mais ou menos efetivos na elevação da resistência à compressão das misturas. O fíler apresentou todos seus resultados em grupos abaixo do traço REF, confirmando que este resulta em redução da resistência à compressão da argamassa quando adicionado nos teores adotados; A ACA foi classificada no mesmo grupo de REF ou em grupos imediatamente superiores, confirmando que este MCS resulta em compensação da perda de clínquer e, a depender do traço, aumento de resistência; e ACB foi classificada nos grupos mais altos, acima de ACA. Tudo isso corrobora com os resultados já obtidos anteriormente de que ACB apresenta tendência de elevar consideravelmente a resistência à compressão das misturas, sendo mais eficiente que ACA.

Contudo, ressalta-se que estas análises levaram em conta apenas os efeitos mecânicos dos traços, não considerando variáveis como impacto energético, ambiental, econômico ou variações na microestrutura das misturas dos diferentes traços analisados.

#### **4.8 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Ao se avaliar o índice de desempenho na resistência à compressão das misturas avaliadas, constatou-se que as argilas calcinadas A e B apresentam reatividade pozolânica promissora para a produção de cimentos na região do DF, tendo apresentado índices de desempenho superiores aos do traço referência na idade de 28 dias para todos os teores de substituição estudados.

Tanto a incorporação de ACA quanto de ACB demandou consumo de SP para que fosse mantida a consistência fixada para as misturas. Foram necessários teores mais elevados para os traços contendo ACB chegando a 1,05% em relação à massa de aglomerante. Este comportamento indica que, assim como apontado pelos ensaios de Superfície BET e Granulometria à Laser, ambos os MCS analisados apresentam elevada superfície específica, apresentando elevado potencial de reação pozolânica nas primeiras idades.

As misturas contendo ACA apresentaram índices de desempenho que variaram de 108,6% em A35 a 133,0% em A15. Os teores de 25% e 35% de substituição apresentaram valores superiores aos do traço REF, embora que não classificam o MCS como um material

altamente pozolânico, ainda assim os traços A25 e A35 foram capazes de corrigir o valor de resistência do CPI utilizado na pesquisa (que não atingiu sua resistência mínima de 40,00 MPa) aos 28 dias. Já o traço A15 apresentou promissora elevação da resistência à compressão em relação à REF ultrapassando o desempenho do traço B35.

Observou-se também que o aumento no teor de substituição de ACA resultou na queda da resistência à compressão das misturas, fato que pode ser relacionado com o efeito pozolânico atenuado desta argila calcinada em relação a ACB.

As misturas contendo ACB resultaram em índices de desempenho elevados, variando de 130,4% a 148,7% a depender do teor analisado, dessa forma, ao contrário de ACA, a argila calcinada B pôde ser considerada um material altamente pozolânico. Foi notado que o aumento do teor de substituição de ACB não resultou necessariamente em aumento da resistência à compressão das misturas, o teor de 25% representou o pico de resistência enquanto os teores de 15% e 35% apresentaram resultados aquém deste.

A Tabela 4.14 apresenta um resumo da influência dos efeitos físicos e pozolânicos na variação da resistência à compressão dos traços contendo ACA e ACB. Tais resultados só foram passíveis de serem obtidos devido à metodologia empregada, por meio da produção de MCS com comportamentos físicos similares e o uso de um FS inerte.

Tabela 4.14 - Resultados da Influência dos efeitos de ACA e ACB na Resistência À Compressão das Misturas

Traço	Parcelas de Resistência devido a Efeitos Pozolânico e Físico			
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
Resistência relativa ao Efeito Pozolânico [MPa]				
A15	27,5%	36,0%	24,0%	41,4%
A25	27,1%	18,0%	27,2%	33,3%
A35	22,9%	8,9%	25,2%	43,3%
B15	13,8%	34,2%	38,2%	43,5%
B25	40,1%	33,4%	46,9%	49,6%
B35	38,2%	40,0%	54,4%	52,9%
Resistência relativa ao Efeito Físico [MPa]				
A15/B15/F15	-25,5%	-0,8%	-7,0%	-5,3%
A25/B25/F25	-20,9%	1,9%	-10,1%	0,0%
A35/B35/F35	-69,1%	2,1%	-11,6%	-3,2%

Observou-se que o em todos os teores analisados, o efeito físico dos MCS não foi capaz de superar a diminuição do consumo de clínquer aos 28 dias. Embora para o teor de 25% tenha sido capaz de praticamente compensar este efeito.

A argila calcinada A, no teor de 15% de substituição, apresentou elevados ganhos de resistência à compressão até os 7 dias de idade. Este resultado condiz com a caracterização deste material, e é seguido por um ganho promissor de resistência entre os 7 e 28 dias. Entretanto, embora seja apresentada influência do efeito pozolânico na resistência à compressão dos traços A25 e A35, todos os resultados apresentaram valores inferiores de ganho em relação a A15 em todas as idades (com exceção do 7º dia de A25). Esse comportamento indica um baixo efeito pozolânico efetivo de ACA.

A ACB apresentou grande desenvolvimento de resistência à compressão devido ao efeito pozolânico para todos os teores de substituição entre as idades de 7 e 28 dias. Este fato aponta para um maior potencial pozolânico deste MCS, apesar de sua menor superfície específica (que afeta seu desempenho nas idades de até 7 dias). Todos os ganhos obtidos devido ao efeito pozolânico aos 28 dias de ACB são superiores aos de ACA nas mesmas idades, corroborando com a hipótese de a argila calcinada B ser mais efetiva do que a argila calcinada A.

A Tabela 4.15 apresenta a parcela de resistência à compressão devida ao efeito pozolânico dos traços contendo ACA e ACB aos 28 dias de idade. Enquanto o efeito pozolânico foi responsável por até 43,3% da resistência à compressão apresentada pelas misturas A15, A25 e A35, aos 28 dias de idade, os ganhos absolutos de resistência dos traços contendo ACB foram consideravelmente superiores.

Tabela 4.15 - Resistência À Compressão relativa ao Efeito Pozolânico (28 dias)

28 dias	
Traço	Parcela da resistência advinda do efeito pozolânico
A15	41,4%
A25	33,3%
A35	43,3%
B15	43,5%
B25	49,6%
B35	52,9%

Os valores apresentados pelos traços contendo ACB variaram de 43,5% a 52,9%, sendo todos superiores aos de valores apresentados por ACA. Ou seja, aproximadamente metade do desempenho mecânico apresentado por B25 e B35 (superiores numericamente aos de ACA) é devido ao efeito pozolânico de ACB. Dessa forma, fica nítido que o efeito pozolânico de ACB foi superior ao de ACA, confirmando a hipótese (juntamente com a análise estatística e os resultados de índice de desempenho) de que ACB possui efeito pozolânico mais proeminente do que a ACA. Este comportamento pode ser justificado pelos resultados de DRX de ACB, que indicam que o material possui composição mais caulínica do que ACA (que apresentou também picos de ilita).

Contudo, constatou-se que o traço A35 é ambientalmente vantajoso para a produção de cimentos, uma vez que atinge índice de desempenho superior ao de REF, resistência próxima a 40,00 MPa e consome 35% menos clínquer do que a referência. Isso porque apresenta menor consumo de clínquer que A25 e mesmo assim possui comportamento estatístico similar ao de A25, que possui desempenho mecânico numericamente superior ao de A35.

Já a mistura B25 apresentou maior índice de desempenho aos 28 dias de idade, com grande efeito pozolânico (ganho de 26,19 MPa devido a este) e um nível considerável de substituição de CPI por um MCS, resultado confirmado pelo Teste de Duncan e Análise de Variância. Dessa forma, entre os traços analisados, este é o mais recomendado em termos de resistência à compressão.

## 5 CONCLUSÕES

Conclui-se que:

- Foi possível produzir duas argilas calcinadas com granulometria similar, entretanto com efeitos pozolânicos distintos devido às diferenças moleculares (diferentes jazidas) e de morfologia (superfície específica);
- A argila ACA apresentou desempenho superior estatisticamente ao traço referência, sendo recomendada para a produção de CP IV 40 ou CP IV 32 nos teores de 25 e 35% de substituição;
- O efeito pozolânico de ACA resultou em ganhos de resistência de até 19,55 MPa aos 28 dias, sendo responsável por 41% do ganho de resistência da mistura A15 aos 28 dias;
- ACB apresentou elevada reatividade pozolânica já a partir dos 7 dias de idade, fruto de sua elevada finura. Aos 28 dias de idade este material resultou em índice de desempenho de 148,7% com teor de 25% de substituição;
- O efeito pozolânico de ACB foi responsável por até 52% do ganho de resistência obtido aos 28 dias no traço B35. Reafirmando o pronunciado efeito pozolânico do material;
- A Argila Calcinada B é viável de ser utilizada para a produção de cimentos de elevado desempenho, reduzindo impacto ambiental e desenvolvendo ganhos extras de resistência à compressão da mistura;
- A argila ACB se provou mais eficiente em sistemas cimentícios como MCS do que a argila ACA, embora ambas tenham suas diferentes utilidades no uso como MCS.

Assim, pode-se concluir que o uso de ACA e ACB resulta em aumento da resistência à compressão das misturas estudadas. Os diferentes teores de substituição utilizados foram capazes de compensar a perda de clínquer da mistura aos 28 dias e aprimorar o comportamento mecânico das argamassas em razão do efeito pozolânico das argilas calcinadas.

## **5.1 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

- Os valores de resistência obtidos por A25 e A35 se aproximaram consideravelmente de 40,00 MPa, valor característico (e não atingido) do CPI, assim recomenda-se estudos com teores variando entre 25% e 35% de substituição para se avaliar o teor ótimo de substituição que resultaria na correção deste cimento;
- Estudo dos traços na idade de 91 dias para uma compreensão do efeito de ACA e ACB em longo prazo;
- Estudo do efeito destes MCS na microestrutura e durabilidade de sistemas cimentícios;
- Estudo do uso de ACA e ACB na produção de cimentos LC<sub>3</sub>;
- Aprimoração da metodologia de estudo dos efeitos pozolânico e físico de MCS na resistência à compressão de misturas cimentícias.

## REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215: Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11579: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653: Materiais Pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13956-3: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta: Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15894-2: Cimento Portland — Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 2: Determinação do índice de desempenho com cimento aos sete dias. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15895: Materiais Pozolânicos — Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado - Método Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16606: Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16607: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16697: Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ALHOZAIMY, A.; AL-NEGHEIMISH, A.; ALAWAD, O. A.; JAAFAR, M. S.; NOORZAEI, J. Binary and ternary effects of ground dune sand and blast furnace slag on the compressive strength of mortar. Cement and Concrete Composites, Vol. 34, pp. 734–738, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test Method for Fly ash and raw calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete. ASTM C 618, Philadelphia, 1991.

AMIN, N. U. Use of clay as a cement replacement in mortar and its chemical activation to reduce the cost and emission of greenhouse gases. Elsevier – Construction and Building Materials, Vol 34, pp; 381-384, 2012.

AMIN, N. U.; ALAM, S.; GUL, S. Assessment of pozzolanic activity of thermally activated clay and its impact on strength development in cement mortar. Royal Society of Chemistry Adv., Vol. 5, p 6079, 2015.

ANDRADE, D. S. (2017). Microestrutura de pastas de cimento Portland com nanossílica coloidal e adições minerais altamente reativas. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, 0004/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 319p.

ANTONI, M.; ROSSEN, J.; MARTIRENA, F.; SCRIVENER, K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. Cement and Concrete Research, Elsevier, v. 42, n. 12, p. 1579–1589, 2012.

ANTONI, M. Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone. EPFL, 2013.

BEDIAKO, M.; PUROHIT, S. S.; KEVERN, J. T. Investigation into Ghanaian calcined clay as supplementary cementitious material. ACI Materials Journal, Vol. 114, No. 6, 2017.

CEMBUREAU – THE EUROPEAN CEMENT. Activity Report 2015. (2015) Disponível em: < [http://cembureau.eu/media/1503/2015activityreport\\_cembureau.pdf](http://cembureau.eu/media/1503/2015activityreport_cembureau.pdf)>. Acessado em: 29 jun. 2019.

CHAKCHOUK, A.; SAMET, B.; MNIF, T. Study on the potential use of Tunisian clays as pozzolanic material. Elsevier - Applied Clay Science, Vol 33, pp 79-88, 2006.

CORDEIRO, G. C.; DÉsir, J. M. Potencial de argila caulínica de Campos dos Goyatacazes, RJ, na produção de pozolana para concreto de alta resistência. Cerâmica, Vol. 56, pp. 71-76, 2010.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; EINGOT, E. Mineral admixture in mortars quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration. Cement and Concrete Research, Vol 35, pp. 719–730, 2005.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: G. C. Isaia, Ed., Concreto: ciência e tecnologia, São Paulo: IBRACON, 2011. p. 261-309.

DE LA VARGA, I.; CASTRO, J.; BENTZ, D. P.; ZUNINO, F.; WEISS, J. Evaluating the hydration of high volume fly ash mixtures using chemically inert fillers. Construction and Building Materials, Vol. 161, pp. 221-228, 2018.



FAN, Y.; ZHANG, S.; WANG, Q.; SHAH, S. P. The effects of nano-calcined kaolinite clay on cement mortar exposed to acid deposits. *Construction and Building Materials*, Vol. 102, pp 486-495, 2016.

FENNIS, S. A. A. M.; WALRAVEN, J. C.; UIJL, J. A. D. The use of particle packing models to design ecological concrete. *HERON*, Vol 54, pp. 185–204, 2009.

FLORES, Y. C.; CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M. Performance of Portland cement pastes containing nano-silica and diferente types of sílica. *Construction and Building Materials*, Vol. 146, pp. 524-530, 2017.

GUTTERIDGE, W. A.; DALZIEL, J. A. Filler cement: The effect of the secondary component on the hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, Vol. 20, pp. 778-782, 1990.

HOLLANDERS, S.; ADRIAENS, R.; SKIBSTED, J.; CIZER, Ö.; ELSSEN, J. Pozzolanic reactivity of pure calcined clays. *Applied Clay Science*, Vol.132-133, pp.552-560, 2016.

HOPPE FILHO, J. et al. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 22, n. 3, 2017.

HUANG, Y.; DENG, J.; WANG, W.; FENG, Q.; XU, Z. Preliminary investigation of pozzolanic properties of calcined waste kaolin. *Materials Science*, Vol. 24, 2018.

JALAL, M.; PAULADKHAN, A.; HARANDI, O. F.; JAFARI, D. Comparative study on effects of Class F fly ash, nano sílica and sílica fume on properties of high performance self compacting concrete. *Elsevier – Construction and Building Materials* 94 (2015) 90-104.

KAMINSKAS, R.; MONSTVILAITE, D.; VALANCIENE, V. Influence of low-pozzolanic activity calcined mica clay on hydration and hardening of Portland cement. *Advances in Cement Research*, Vol. 30, n. 6, pp. 231-239, 2018.

LHENE, J.; PRESTON, F. Making Concrete Change - Innovation in low-carbon Cement and Concrete. Chatam House Report. Chatam House, the Royal Institute of International Affairs. ISBN 978 1 78413 272 9. Londres, 2018.

LI, M.; ZHU, X.; MUKHERJEE, A.; HUANG, M.; ACHAL, V. Biomineralization in metakaolin modified cement mortar to improve its strength with lowered cement content. *Journal of hazardous materials*. Vol. 329, pp 178-184. Maio, 2017.

LIU, Y.; LEI, S.; LIN, M.; XIA, Z.; PEI, Z.; LI, B. Influence of calcined coal-series kaolin fineness on properties of cement paste and mortar. *Construction and Building Materials*, Vol. 171, pp. 558-565, 2018.

LINS, D. N. (2017). Análise da Resistência à Compressão do cimento LC<sup>3</sup> e a influência das adições minerais em seu desempenho. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-29A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141p.

MARAGHECHI, H.; AVET, F.; WONG, H. KAMYAB, H.; SCRIVENER, K. Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC<sup>3</sup>) with various kaolinite contents with respect to chloride transport. RILEM, Materials and Structures, Vol 51, p. 125, 2018.

MARTINS, G. L. O. (2018). Influência do teor de sílica amorfa na atividade pozolânica de adições minerais altamente reativas. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação 4A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 131p.

MEHTA, P. K.; AITCIN, P. C. Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high-strength concrete. Special Publication, v. 121, p. 265-286, 1990.

MEHTA P. K.; MONTEIRO P. J. M. Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2 ed. São Paulo, IBRACON. 2014. 782 p.

MITROVIC, A.; ZDUJIC, Z. Mechanochemical Treatment of Serbian Kaolin Clay to Obtain High Reactive Pozzolana. Journal of the Serbian Chemical Society 78 (4): pp. 579–90. 2013.

MODLER, L.E.; RUPP, R.F.; PREDIGER, P.W.; BOEIRA, F.D. Concreto bombeável com adição de finos basálticos – Análise das características físicas. In: Congresso Brasileiro do Concreto – CBC, 49., Bento Gonçalves, 2007. São Paulo: IBRACON, 2007.

MOHAMMED, S.; ELHEM, G.; MEKKI, B. (2016). Valorization of pozzolanicity of Algerian clay: Optimization of the heat treatment and mechanical characteristics of the involved cement mortars. Applied Clay Science, 132-133, 711–721.

MURAT, M. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. I. Preliminary investigation on metakaolinite. Cem Concr Res. Vol.13, pp 259–66, 1983.

MWITI, M. J.; KARANJA, T. J.; MUTHENGIA, W. J. Properties of activated blended cement containing high content of calcined clay. Heliyon 4 (2018) e00742.

OLIVEIRA, M. P. de; BARBOSA, N. P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 10, n. 2, p. 490-496, 2006.

PLATIAS, S; VATALIS, K. I.; CHARALAMPIDES, G. Suitability of quartz sands for diferente industrial applications. Procedia Econ. Financ, Vol. 14, pp. 491-498, 2014.

PINHEIRO, D. G. L. (2018). Microestrutura de pastas de cimento com adição de argila calcinada e nanossílica. Qualificação de Doutorado em Estruturas e Construção Civil. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 45p.

RAHHAL, V.; TALERO, R. Calorimetry of Portland cement with sílica fume, diatomite and quartz additions. Elsevier - Construction and Building Materials, Vol 23, pp. 3367-3374, 2009.

RASHAD, A. M. Effect of quartz-powder on the properties of conventional cementitious materials and geopolymers. Materials Science and Technology, pp. 1-14, 2018.

ROCCHI, A.C.N.L.; OLIVEIRA, J.M. (2017). Avaliação da resistência à compressão de argamassas com o uso de cimento LC3 com diferentes proporções de fíler calcário e argila calcinada. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 80 p.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and concrete composites*. Vol 23, 6 ed. pp 441-454, 2001.

SAN NICOLAS, R. Approche performantielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash. Tese de Doutorado. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier. p. 329. 2011.

SCRIVENER, K. L. Options for the future of cement. *Indian Concrete Journal*, v. 88, n. 7, p. 11-21, 2014.

SOUZA SANTOS, P.; Argilas para pozolanas. P.294-1311. São Paulo, 1966.

TAYLOR-LANGE, S. C. et al. Calcined kaolinite–bentonite clay blends as supplementary cementitious materials. *Applied Clay Science*, v. 108, p. 84-93, 2015.

TIKKANEN, J.; CWIRZEN A.; PENTTALA V. Effects of mineral powders on hydration process and hydration products in normal strength concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 72, pp. 7–14, 2014.

TIRONI, A.; CASTELLANO, C. C.; BONAVETTI, V. L.; TREZZA, M. A.; SCIAN, A. N.; IRASSAR, E. F. Kaolinitic calcined clays – Portland cement system: Hydration and properties. *Construction and Building Materials*. Vol. 64, pp 215-221, 2014.

TIRONI, A.; CRAVERO, F.; SCHIAN, A. N.; IRASSAR, E. F. Pozzolanic activity of calcined halloysite-rich kaolinitic clays. *Applied Clay Science*, Vol. 147, pp.11-18, 2017.

TIRONI, A.; TREZZA M. A.; SCIAN A. N.; IRASSAR E. F. Thermal analysis to assess pozzolanic activity of calcined kaolinitic clays. *J Therm Anal Colorim*. 117:547-556, 2014.

WANG, Y.; YE, G.; VAN BRENGEL, K. Microestructure of cement paste blended with micronized sand (MS). *Durability of Building Materials and Components, Building Pathology and Reahabilitation* 3, pp. 61-84, 2013.

YANGUATIN, H.; TOBÓN, J.; RAMÍREZ, J. Reactividad puzolánica de arcillas caoliníticas una revisión. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 32, pp. 13-24, 2017.

ØSTNOR, T. A.; JUSTNES, H. Durability of mortar with calcined marl as supplementary cementing material. *Advances in Cement Reserach*, Vol. 26, n. 6; pp. 344-352, 2014.

## **APÊNDICE A – Curvas Granulométricas Individuais dos Aglomerantes Utilizados**

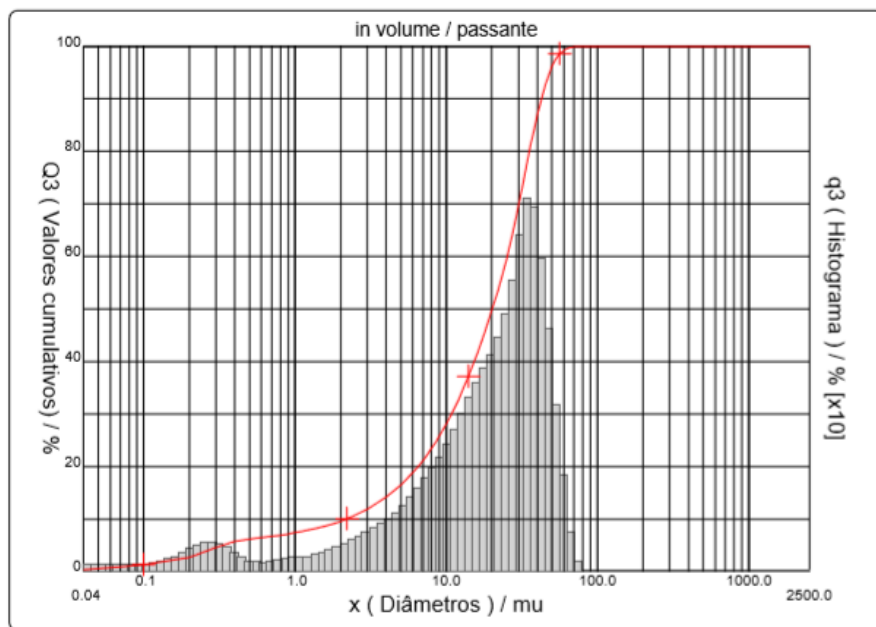


Figura A5 - Curva Granulométrica obtida no ensaio de Granulometria à Laser do Cimento Portland

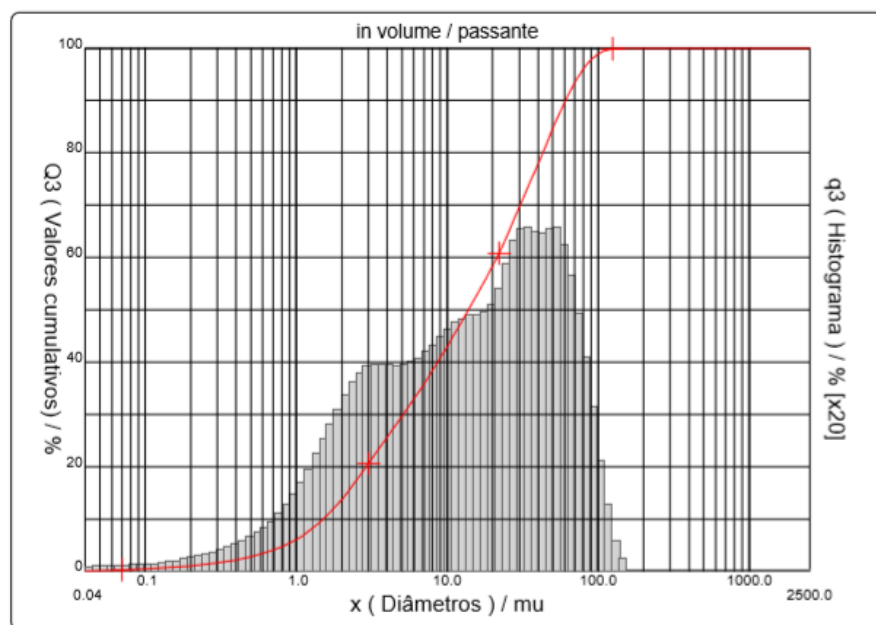


Figura A6 – Curva Granulométrica do Fíler Silícico com 7 horas moagem.

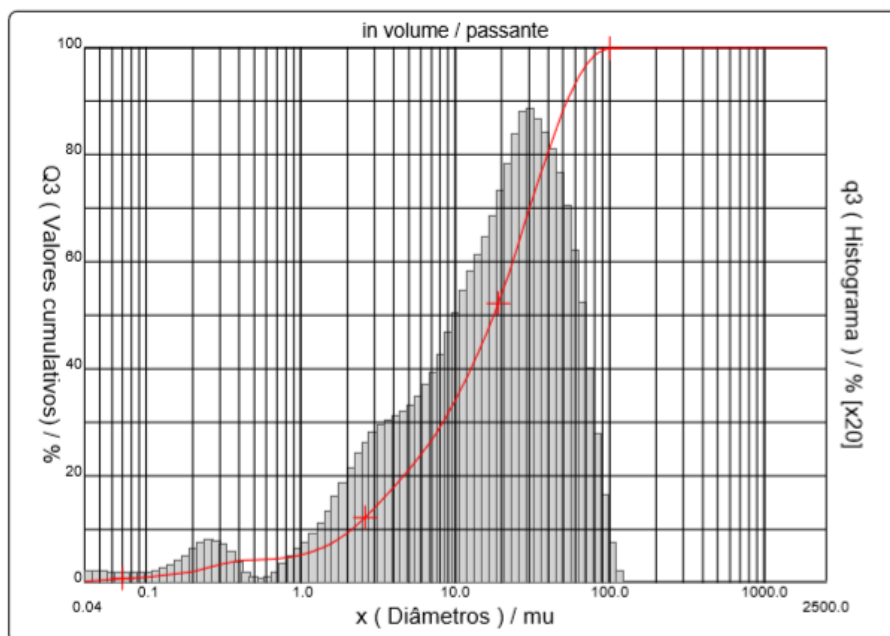


Figura A7 - Curva Granulométrica da ACA após 4 horas de moagem

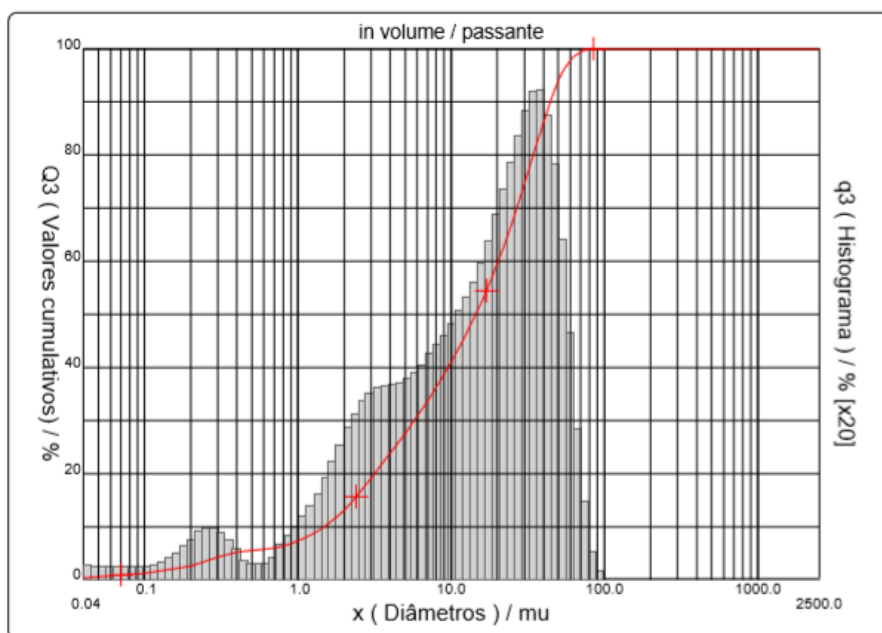


Figura A8 - Curva Granulométrica da ACB após 4 horas de moagem

**APÊNDICE B - Resultados de Resistência à Compressão**  
**Detalhados por Corpo de Prova**

Tabela B1 – Resistência à compressão dos corpos de prova

Traço	Resistência à Compressão [MPa]							
	1 dia		3 dias		7 dias		28 dias	
	Individuais	Média	Individuais	Média	Individuais	Média	Individuais	Média
REF	11,50	13,19	20,45	21,14	31,25	31,35	38,90	35,53
	13,85		23,23		30,00		37,30	
	14,23		21,73		32,57		29,30	
	13,17		19,13		31,58		36,63	
F15	11,33	11,03	15,14	17,05	28,04	25,06	26,11	27,72
	9,29		20,44		24,62		26,50	
	10,84		17,18		21,23		27,80	
	12,64		15,45		26,33		30,47	
F25	10,18	10,19	12,85	14,30	18,45	20,53	26,13	26,65
	10,85		13,76		19,75		25,97	
	9,80		14,36		20,61		28,59	
	9,93		16,23		23,30		25,90	
F35	4,81	5,94	15,85	16,50	17,52	18,24	23,40	21,88
	6,21		15,50		17,14		22,10	
	6,32		18,16		20,07		23,00	
	6,40		16,49		18,23		19,00	
A15	15,42	15,18	28,21	28,20	33,34	33,28	50,17	47,27
	17,69		27,43		33,83		45,75	
	12,20		27,52		32,95		46,46	
	15,40		29,62		32,98		46,70	
A25	13,47	13,98	19,96	20,12	28,40	29,40	32,75	39,96
	13,76		20,25		29,98		41,77	
	13,61		19,93		29,81		42,93	
	15,09		20,33		29,40		42,39	
A35	7,84	7,78	15,69	15,70	22,63	24,45	40,20	38,58
	8,28		16,01		25,67		33,75	
	7,79		15,90		23,55		41,07	
	7,21		15,20		25,95		39,29	
B15	12,54	12,76	26,64	27,42	41,95	40,95	48,79	49,09
	12,38		27,99		41,71		53,75	
	12,66		26,26		41,17		48,91	
	13,46		28,77		38,96		44,91	
B25	16,62	17,04	26,40	24,76	41,30	40,29	52,09	52,84
	17,43		21,31		41,68		50,04	
	17,45		26,41		41,38		54,31	
	16,66		24,92		36,78		54,91	
B35	10,52	9,70	23,55	23,84	40,56	40,13	37,68	46,43
	8,56		24,38		40,83		48,24	
	9,61		23,80		39,35		49,36	
	10,12		23,62		39,77		50,45	